

**TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU**  
**Sähkötekniikan koulutusohjelma**  
**sähkövoimatekniikka**

**Tutkintotyö**

**Henri Melva**

**KARTONKITEHTAAN KESKIJÄNNITEVERKON KUNTOKARTOITUS**

**Työn valvoja**  
**Työn teettäjä**  
**Tampere 2007**

**Tekn. lis. Seppo Janhonen**  
**M-real Oyj Tako Board, ohjaajana DI Jouni Luukkonen**

Melva, Henri

Takon kartonkitehtaan keskijänniteverkon kuntokartoitus

Tutkintotyö

50 sivua + 8 liitesivua

Työn valvoja

Tekn. lis. Seppo Janhonen

Työn teettäjä

M-real Oyj Tako Board, ohjaajana DI Jouni Luukkonen

Vuosi 2007

Hakusanat:

oikosulkuvirta, keskijänniteverkko, kuntokartoitus

## TIIVISTELMÄ

Työssä tutkittiin M-real Oyj Tako Board -kartonkitehtaan keskijänniteverkon kuntoa niin silmämääräisillä tarkastuksilla kuin laskentaan perustuvien arviointimenetelmin. Työn tarkoituksena oli varmistaa keskijänniteverkon määräystenmukaisuus ja tehdä verkolle mekaaninen kuntokartoitus. Kuntokartoituksen hyödyt tulevat olemaan verkon tulevaisuuden suunnittelun helpottaminen, sekä mahdollisten huoltotoimenpiteiden tarpeen kartoittaminen.

Työssä saadut tulokset perustuvat kertamittauksen avulla saatujen hetkellisten kuormitusilanteiden perusteella tehtyihin laskelmiin. Kuormituksen luonne on prosessiteollisuudessa staattista, joten laskelmia voi pitää riittävän tarkkoina. Mittausten ja muiden tarkastusten perusteella keskijänniteverkko on kunnoltaan hyvä ja täyttää määräykset oikosulkuvirtojen osalta joitakin poikkeusilanteiden kytkentöjä lukuun ottamatta. Keskijänniteverkon mekaaninen kunto on kokonaisuutena ajatellen hyvä. Suurin osa verkon komponenteista on niin uusia, että niiden voi olettaakin olevan täysin kunnossa.

Mitattujen tulosten perusteella suurin ongelma Takon keskijänniteverkossa on kompensoinnin riittävyys. Kaikki kolme kompensointiparistoa toimivat nimellistehollaan, joten kuormituksen lisääminen lisää syöttävästä verkosta otettavan loistehon määrää ja voi johtaa jopa loistehomaksuihin. Nykyisellä kuormituksella kompensointi toimii suunnitellusti, joten muutostyöt eivät ole tässä vaiheessa välttämättömiä.

Melva, Henri                      Condition survey of mid-voltage electric network in Tako board mill

BSc thesis                      50 pages + 8 enclosures  
Supervisor                      Licentiate in Technology Seppo Janhonen  
Commissioned by              M-real Oyj Tako Board, instructor MSc Jouni Luukkonen  
Year 2007

Keywords:                      short-circuit current, mid-voltage electric network, condition survey

## ABSTRACT

The subject of this thesis was to perform a condition survey to the mid voltage electric network in Tako board mill. The condition survey was made using methods like measurements, inspections and calculations. This thesis will help Tako board mill design their maintenance schedule to the components in the mid-voltage electric network.

Calculations in this thesis are based on one situation power factor measurements, but that is acceptable, because the electric load is very static in paper industry. Electric network was generally in good condition. Short-circuit currents were not a problem in any normal wiring of the electric network.

The result of this thesis was that the biggest problem in the electric network is sufficiency of compensation. All three compensation units were used with maximal power. If there is need to increase electrical load in the paper mill, there is a big possibility having to add a fourth compensation unit to the electric network. If no electrical load is added, the compensation of the network works as designed.

# ALKUSANAT

Työn tarkoituksena oli selvittää kartonkitehtaan keskijänniteverkon kuntoa. Työn aihe saatiin M-real Oyj:ltä syksyllä 2006, ja se tehtiin talven 2006 – 2007 aikana. Työssä mielenkiintoisinta oli tehtaan vikavirtojen tutkiminen. Aihe on kuitenkin teoreettinen, sillä oikosulkuvirtoja ei käytännössä voi mitata.

Kiitokset työn toteutuksen avustamisesta kuuluvat Takon kartonkitehtaalte, erityisesti diplomi-insinööri Jouni Luukkoselle ja Automaatio-osaston työnjohtajille. Lisäksi haluan kiittää Avopuolisoani Taru Seppälää tuesta ja kärsivällisyydestä.

Tampereella 19. Huhtikuuta 2007

Henri Melva

## SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT .....	3
ALKUSANAT .....	4
1 JOHDANTO .....	6
2 M-REAL TAKON HISTORIA.....	7
3 SÄHKÖVERKON RAKENNE .....	8
3.1 Yleistä .....	8
3.2 Muuntajat .....	10
3.3 Kojeistot.....	11
3.4 Kaapeliyhteydet .....	11
4 MITTAUKSET JA MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI .....	12
4.1 Tehokertoimet ja hetkellinen kuormitus tilanne .....	12
4.1.1 Mittauskytkentä .....	13
4.1.2 TAKO1-kojeiston mittaustulokset.....	14
4.1.3 TAKO2-kojeiston mittaustulokset.....	15
4.1.4 TAKO3-kojeiston mittaustulokset.....	16
4.1.5 TAKO4-kojeiston mittaustulokset.....	17
4.2 Loistehotasapaino ja kompensointiparistojen kuormitus tilanne.....	18
4.3 Mittaustulosten tarkastelu .....	19
5 VIKAVIRRAT .....	20
5.1 Oikosulku .....	20
5.2 Oikosulkuvirran luonne .....	21
5.3 Oikosulkulaskennan komponentit.....	22
5.3.1 Syöttävä verkko .....	22
5.3.2 Muuntajat.....	24
5.3.3 Kaapelit ja kiskot .....	26
5.3.4 Kondensaattorit.....	26
5.3.5 Tahtikoneet .....	26
5.3.6 Epätahtikoneet .....	29
5.3.7 Epätahtikoneryhmät.....	30
5.3.8 Sysäysoikosulkuvirta .....	31
5.3.9 Terminen oikosulkuvirta .....	32
5.4 Oikosulkuvirran laskeminen TAKO4:n pääkiskostossa .....	34
5.5 Oikosulkuvirrat Takon keskijänniteverkossa.....	41
6 SILMÄMÄÄRÄINEN TARKASTUS .....	44
6.1 Tarkastuksen tulokset.....	45
6.2 Esimerkkejä tarkastuksessa havaituista puutteista.....	45
7 TULOSTEN TARKASTELU .....	49
8 LÄHTEET .....	50
9 LIITTEET .....	50

# 1 JOHDANTO

Työssä on tarkoituksena tutkia M-real Oyj Tako Board -kartonkitehtaan keskijänniteverkon kuntoa. Tutkimus käsittää niin mekaanisen kuntokartoituksen kuin sähköverkon oikosulkuvirtojen määrittämisen. Kuntokartoituksen tekee tarpeelliseksi se, että edellisestä tarkastuksesta on kulunut jo lähes 15 vuotta, ja sähköverkon rakenne on muuttunut sitten viime kartoituksen.

Työ toteutetaan vuoden 2006 syksyn ja vuoden 2007 kevään välisenä aikana. Siinä käsitellään hetkellisen kuormitustilanteen tehokertoimien ja verkon komponenttien nimellisarvojen avulla laskettavien keskijänniteverkon oikosulkuvirtojen suuruutta ja silmämääräisien tarkastusten avulla keskijänniteverkon mekaanista kuntoa. Lisäksi työssä on tarkoitus tutustua verkon loistehotasapainoon mittausten suomien mahdollisuuksien mukaan ja päivittää muuntaja- kaapeli- ja kojeistoluettelot tarpeellisin osin.

Tutkintotyöstä on Takolle hyötyä verkon suunnittelun apuvälineenä. Tehtaalla on juuri tekeillä suuria muutoksia, esimerkiksi yksi kartonkikone ajetaan alas, joten verkon tilan tunteminen on muuttuvassa tilanteessa tärkeää. Itselleni työ antaa tietoa teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskennasta, mistä on hyötyä erityisesti tulevaisuudessa mahdollisissa suunnittelutöissä.

## 2 M-REAL TAKON HISTORIA

Takon kartonkitehdas sijaitsee aivan Tampereen ydinkeskustassa, Tammerkosken rannalla. Kartonkitehtaan historia alkoi, kun Fredrik Idestam perusti Suomen ensimmäisen puuhiomon Tammerkosken alajuoksulle vuonna 1865. Tehdas valmisti alkuaikoina esimerkiksi kattuhuopaa, ja nykyinen tuote eli taivekartonki otettiin mukaan tuoteohjelmaan vuonna 1932. /1/

G.A. Serlachius omisti Takon tehtaan vuoteen 1987 asti, jolloin G.A. Serlachius ja Metsäliiton teollisuus fuusioituivat Metsä-Serlaksi. Fuusioitumisen taustalla oli halu varmistaa tulevan yhtiön merkitys kansainvälisillä markkinoilla ja yhtiön riittävän monipuolinen tuotevalikoima sekä tulevaisuudessakin riittävä kilpailukyky. /2/

Metsä-Serla Oy muodosti yhdessä Metsäliitto-osuuskunnan, Finnforest Oy:n ja Metsä-Botnia Oy:n kanssa vuonna 1992 Metsäliitto-konsernin. Metsä-Serla vaihtoi nimensä vuonna 2001 M-realiksi. M-real on nykyään UPM:n ja Stora-Enson rinnalla pieni metsäteollisuusyritys, mutta toistaiseksi sekin on pärjännyt, vaikka nykyinen hienopaperin lievä ylituotanto koskettaa edellä mainituista yrityksistä kovimmalla kädellä juuri M-realia. /2/

Takon kartonkitehdas keskittyy tuotannossaan pitkälle kehiteltyihin erikoiskartonkeihin. Suurin osa Takon tehtaan tuotannosta menee tupakkateollisuuden käyttöön. Muita merkittäviä ostajia ovat kosmetiikka- ja elintarviketeollisuus sekä graafinen ala.

Takon tehdaskiinteistössä on pitkät perinteet niin teollisuudella kuin sähkön käytölläkin. Molemmat ovat kulkeneet käsi kädessä lähes teollisuustuotannon alkuajoista lähtien. Takon tehtaalle sähkövalaistus saatiin muutamia vuosia myöhemmin kuin Finlaysonin kehräämööseen, jossa syttyivät Suomen ensimmäiset sähkövalot vuonna 1882.

## 3 SÄHKÖVERKON RAKENNE

### 3.1 Yleistä

Takon kartonkitehtaan sähkönsyöttö tapahtuu ulkoisten siirtoyhteyksien osalta Tampereen kaupungin sähkölaitoksen (TKS) 110 kV:n keskijänniteverkon kautta. 110 kV / 20 kV:n muuntaja sijaitsee Ratinassa ja on TKS:n ja M-real Oyj:n yhteisomistuksessa.

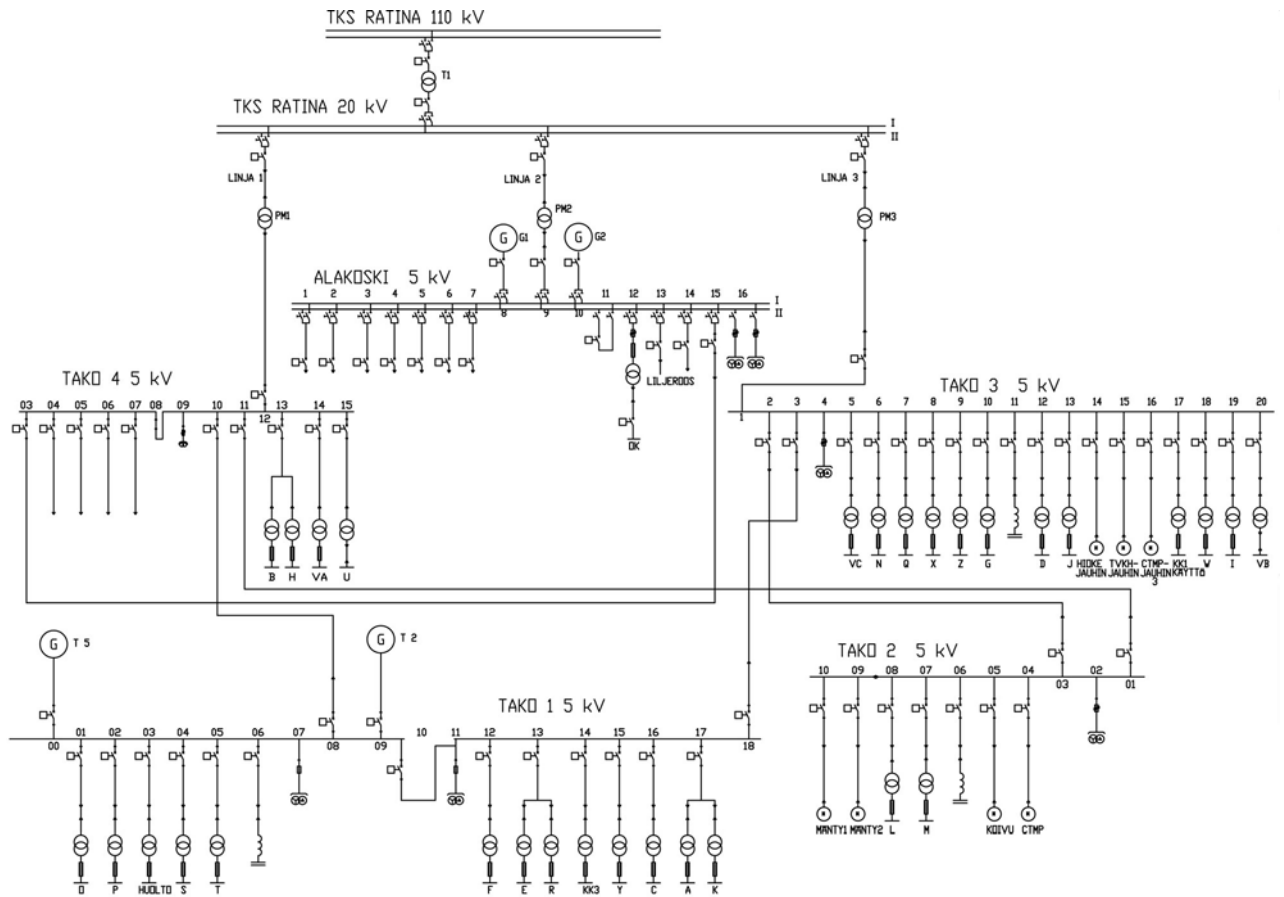
Kartonkitehtaalte sähkö tulee maakaapeleita pitkin Ratinassa sijaitsevien kolmen päämuuntajan kautta. Linjan 1 yhteys on toteutettu kahden APYAKMM 3x185 mm<sup>2</sup> kaapelin rinnankytkennällä ja linjan 3 yhteys kahden AHXAMK-W 3x185 mm<sup>2</sup> kaapelin rinnankytkennällä. Päämuuntajat toimivat jännitetasossa 20 kV / 5 kV. Ratinasta tulevista yhteyksistä yksi on Alakoski oy:n käytössä, mutta liittyy kartonkitehtaan tuotantoon siten, että sitä on mahdollista käyttää varayhteytenä omien päämuuntajien vikatilanteissa. Alakosken käytössä olevan linjan 2 yhteys on toteutettu PYLKVJ 3x120 mm<sup>2</sup> ja APYAKMM 3x185 mm<sup>2</sup> kaapeleiden rinnankytkennällä.

M-real Takon 5 kV:n keskijänniteverkko on jakaantunut neljään kojeistoon. Näiden lisäksi verkkoon kuuluu Alakoski oy:n 5 kV:n kojeisto. Kojestot ovat kautta linjan kohtuullisen uusia ja vaunukatkaisijoilla toteutettuja, lukuun ottamatta Alakoski oy:n kojeistoa, jossa on käytössä vielä vanhempia katkaisijamalleja.

Takon kartonkitehtaan keskijänniteverkko on toteutettu kokonaisuudessaan kaapeliverkkona. Avojohtoja ei ole käytetty missään kohdassa, mukaan lukien koko tehtaan sähkönsyöttö. 20 kV:n kaapelireittien yhteispituus on Takon tehdasalueella noin 4,8 km. 5 kV:n kaapeleiden yhteispituus on noin 6 km.

Keskijänniteverkon pelkistetty rakenne on esitettynä seuraavassa kuvassa.





Kuva 1. Takon keskijänniteverkon pelkistetty pääkaavio

Kuvasta 1 näkyy, että verkon rakenne on rengasmainen. Normaalikäytössä verkko on kuitenkin kytketty säteittäisesti. Normaalikäyttötapa verkolle on, että syötöt tapahtuvat säteittäin, siten että päämuuntaja PM1 syöttää TAKO1-, TAKO2- ja TAKO4-kojeiston ja päämuuntaja PM2 syöttää TAKO3-kojeiston. Alakosken, eli linja 2:den yhteyttä ei tavallisesti käytetä kartonkitehtaan tuotannon ylläpitoon.

Oikosulkuvirtojen kannalta kriittisimmät tilanteet ovat verkossa silloin, kun johonkin kojeistoon tulee rinnakkaisia syöttöjä. Tällöin on mahdollista, että katkaisijoiden nimelliskatkaisuvirrat ylitetään. Standardin SFS 6001 mukaan piirien kytkennät voidaan tehdä siten, että normaalisti erillään käytettävät asennuksen osat kytketään yhteen kytkentätoimenpiteitä varten, vaikka tällöin esiintyvät oikosulkuvirrat ylittävät asennuksen mitoitusarvot. Henkilökuntaan kohdistuvat vaarat tulee tällöin estää käyttämällä kytkentään esimerkiksi kauko-ohjausta. /7/

### 3.2 Muuntajat

Takon 20 kV:n syöttö koostuu kolmesta päämuuntajasta. Muuntajien nimellistehot ovat 10, 15 ja 20 MVA. Päämuuntajien alennettua jännitetaso 20 kV:sta 5 kV:iin siirrytään kartonkitehtaan varsinaiseen 5 kV:n keskijännitejakeluun.

Keskijännitejakelussa Takolla on tällä hetkellä käytössä 33 muuntajaa. Päivitetty muuntajaluettelo on esitetty seuraavassa.

Taulukko 1. Takon päivitetty muuntajaluettelo

Tunnus	Valmistaja	S/kVA	U1/V	U2/V	I1/A	I2/A	kytk.ryh	käyttöpaikka
PM3	ABB Strömberg	20000	22000	5300			Dyn11	Päämuuntaja 3
PM1	Strömberg	15000	22000	5300	394	1634	YNd11	Päämuuntaja 1
PM2	Strömberg	10000	22000	5300	262	1090	Y d11	Päämuuntaja 2
J	SIEMENS	2500	5100	525/303	283	2749	Dyn11	Massaosasto
KK1	SIEMENS	2500	5100	525/303	283	2749	Dyn11	Massaosasto
A	Strömberg	2000	5000	525/303	231	2200	Y y 0	KKII käyttö
B	ABB Strömberg	2000	5100	525/303	231	2200	Dyn11	Hiomo massaos.
D	Strömberg	2000	5100	525/303	226,5	2200	Dyn11	KK1 käyttö
E	ABB Strömberg	2000	5100	525/303	231	2200	Dyn11	KK3 käyttö
G	ABB Strömberg	2000	5100	525/303	231	2200	Dyn11	Massaos,Pastakeittiö
H	Strömberg	2000	5100	525/303	226,5	2200	Dyn11	Hiomo
I	SIEMENS	2000	5100	525/303	226	2199	Dyn11	KK1 käyttö
L	SIEMENS	2000	5100	525/303	226	2199	Dyn11	Massaosasto
M	SIEMENS	2000	5100	525/303	226	2199	Dyn11	Massaosasto
N	SIEMENS	2000	5100	525/303	226	2199	Dyn11	Massaosasto
Q	SIEMENS	2000	5100	525/303	226	2199	Dyn11	Massaosasto
R	Strömberg	2000	5100	525/303	226,4	2199	Dyn11	KK3 käyttö
S	Strömberg	2000	5100	525/303	226,5	2200	Dyn11	KK1 käyttö
T	Strömberg	2000	5100	525/303	226,5	2200	Dyn11	Hiomo massaos.
U	Strömberg	2000	5100	525/303	226,4	2200	Dyn11	Jauhatus massaos.
W	SIEMENS	2000	5100	525/303	226	2199	Dyn11	KK1 käyttö
X	SIEMENS	2000	5100	525/303	226	2199	Dyn11	Massaosasto
Y	Strömberg	2000	5100	525/303	226,4	2199,4	Dyn11	KK2 käyttö
Z	SIEMENS	2000	5100	525/303	226	2199	Dyn11	Massaosasto
VC	ABB	2000	5100	400/231	225,4	2886,8	Dyn5	Valaistus
C	Elin	1600	5100	525/303	181	1760	Y y 0	Yhteinen voima
F	Elin	1600	5100	525/303	181	1760	Y y 0	Viimeistely massaos.
K	Elin	1600	5100	525/303	181	1760	Y y 0	KK2 käyttö
O	Elin	1600	5100	525/303	181	1760	Y y 0	Uusi hv asema
P	Elin	1600	5100	525/303	181	1760	Y y 0	Uusi hv asema
KK3	Strömberg	1250	5250	400/231	137,5	1804	Dyn11	KKIII tasavirtakäyttö
VA	Schorch	1000	5100	400/231	113	1444	Dyn5	Valaistus
VB	Strömberg	1000	5100	400/231	113,2	1444	Dyn5	Valaistus
huoltosähkö	Strömberg	800	5250	400/231	87,98	1154,7	Dyn11	huoltosähköverkko

Muuntajien osalta tarkempi muuntajaluettelo kilpitiotojen kanssa on esitetty liitteessä 1. Laskujen osalta muuntajien impedanssien laskentaan on käytetty liitteen 1 tietoja. Luvut ovat osittain arvioituja.

### **3.3 Kojeistot**

Takolla on käytössä neljä kytkinlaitosta. Alakoski Oy:llä on tehdasalueella lisäksi käytössään yksi kytkinlaitos, Pääkaaviossa näkyvä Alakoski 5kV. Kytkeinlaitosten fyysinen toteutus on Takon omilla asemilla varsin harmoninen, kaikissa kojeistoissa on yksikiskojärjestelmä ja vaunukatkaisijat. Katkaisijat ovat tyypiltään pääosin SF6-eristeisiä, mutta joukossa on muutama vähäöljy- ja tyhjiökatkaisija. Alakoski Oy:n kytkinlaitoksella rakenne poikkeaa edellisestä, sillä siellä on käytössä kaksikiskojärjestelmä ja vanhempaa katkaisijalaitteistoa.

Katkaisijoiden nimellisvirrat vaihtelevat 630 ja 2500 ampeerin välillä. Kennoissa on yhteinen jännitteen mittausta ja jokaisessa lähdössä omat virtamuuntajat. Kojeistojen suurin sallittu yhden sekunnin kestävä termien oikosulkuvirta on 40 kA, ja tätä arvoa käytetään myöhemmin oikosulkuvirtojen laskemisessa suurimpana sallittuna termisenä oikosulkuvirtana. Dynaamisen oikosulkuvirran osalta kojeistojen suurin sallittu arvo on 100 kA.

### **3.4 Kaapeliyhteydet**

Kaapeliyhteydet on toteutettu maakaapeliverkolla. Kaapeleiden pituudet on arvioitu tarvittaessa kaapelireittien perusteella Autocad-ohjelmalla. Mikäli kaapelireiteistä on tarkempaa tietoa, tässä tapauksessa tarvikeluetteloita tms., on pituudet määritetty niiden perusteella.

Kaapeleiden impedanssit ja niiden resistiiviset ja reaktiiviset komponentit on tarkastettu valmistajien luetteloista, mikäli niitä ei ole annettuna Takolta saaduissa kaapeliluetteloissa.

Takon kartonkitehtaan keskijänniteverkon kaapeliluettelo kaapeleiden impedanssiarvoineen ja pituuksineen on esitetty liitteessä 3.

---

## 4 MITTAUKSET JA MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI

Takon sähköverkon nykytilan kartoituksen kannalta on tärkeää tuntea verkon kuormitustilanne ja verkon kuormitusten tehokertoimet. Kuormitustilanteen avulla voidaan laskea verkon eri komponenttien kuormitukset ja päätellä tulosten perusteella komponenttien mitoituksen oikeellisuus. Tehokertoimia voidaan käyttää apuna laskettaessa verkossa esiintyviä oikosulkuvirtoja. Komponenttien toiminnan, häviöiden ja eliniän kannalta kuormitusten tulisi olla sopusoinnussa nimellistehojen kanssa ja oikosulkuvirtojen tulisi olla komponenttien kestävyysasettamissa rajoissa.

Keskijänniteverkon kuormitustilanteen kartoitus ei suoraan kerro pienjänniteverkon kuormitustilannetta, mutta pienjänniteverkon kuormitustilanne voidaan redusoida muuntajan toisiopuolelle, jolloin kuormitusten tarkasteleminen on mahdollista. Tämä on tarpeellista, koska lopulta sähköön käyttökohteet sijaitsevat pääasiassa pienjänniteverkossa. Takolta kyllä löytyy myös moottoreita, jotka toimivat suoraan keskijänniteverkossa, mutta pääsääntöisesti moottoreiden syöttö tapahtuu pienjänniteverkosta. Kartoituksella voidaan myös osoittaa verkosta paikkoja, joissa kuormituksen lisääminen on mahdollista, niin pienjänniteverkon kuin keskijänniteverkon kannalta.

### 4.1 Tehokertoimet ja hetkellinen kuormitustilanne

Mittaukset suoritettiin keskijänniteverkon kuormitustilanteen ja lähtöjen tehokertoimien kertamittauksena joulukuussa 2006 kaikkien kolmen kartonkikoneen ollessa tuotannossa.

Mittaukset toteutettiin mittaamalla Fluke 43 power quality analyzer -mittarilla kennokohtaisesti kolmivaiheiset tehot, jännitteet, virrat ja tehokertoimet mittamuuntajien toisiopuolelta. Koska kaikki kartonkikoneet olivat mittaushetkellä tuotannossa, oli sähköverkossa siirretty teho lähellä suurinta verkossa esiintyvää tehoa, koska paperiteollisuudelle on ominaista hyvin staattinen sähköenergian tarve.

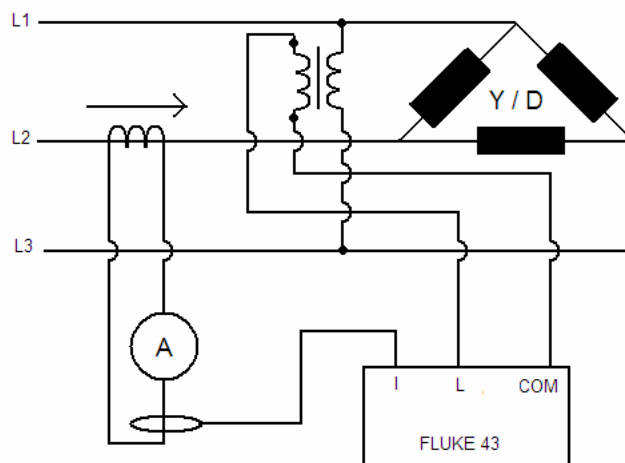
Tehokertoimia hyödynnetään myöhemmin arvioimalla niiden avulla lähtöjen moottorikuormia oikosulkuvirtojen laskennassa. Oikosulkulaskennan kannalta ei ole merkityksellistä, onko muuntajan toisioon kytketty yksi redusoitu isompi moottori vai todellinen määrä pienempiä moottoreita.

Tehokertoimien avulla voidaan myös tutkia verkon kompensointia, sillä voidaan olettaa, että mitatut tehokertoimet pysyvät vakioina kuormitustilanteen muuttuessa. Tämä oletus voidaan tehdä, koska kuormituksen rakenne ei käytännössä muutu lainkaan. Pyöriviä koneita on kuormituksesta aina suurin osa, koska tehtaan pienjännitejärjestelmä on 500 V IT-järjestelmä. Järjestelmään ei voi kytkeä valaistus- tai muutakaan kuormaa ilman erityisjärjestelyitä lainkaan.

#### 4.1.1 Mittauskytkentä

Mittauksissa käytettiin Fluke 43 -mittaria. Jännitetieto saatiin suoraan 1- ja 3-vaiheesta ja virtatieto pihdin avulla 2-vaiheesta. Virtapihdin asetuksena käytettiin 100 mV / A - arvoa, jolloin itse mittari näki virran kymmenkertaisena verrattuna mittarin omaan skaalaukseen, 10 mV / A. Asetus vaihdettiin paremman resoluution toivossa. Tämä seikka on huomioitava laskettaessa lähtöjen kuormituksia kyseisellä hetkellä.

Jännitemuuntajien muuntosuhteet olivat kaikissa tapauksissa  $5500 \text{ V} / \sqrt{3} : 110 \text{ V} / \sqrt{3}$ , mikä tarkoittaa pääjännitteitä käytettäessä arvoja  $5500 \text{ V} / 110 \text{ V}$ . Mittaustulokset kojeistoittain seuraavissa luvuissa.



Kuva 2. Tehokertoimien mittauskytkentä

Mittauskytkentä ei ota huomioon kuormituksen mahdollista epäsymmetrisyyttä, joten on mahdollista, että mittauksissa esiintyy virhettä. Kuormitukset myös vaihtelevat pienessä mittakaavassa jatkuvasti, joten mittarin kaikkien arvojen lukeminen täysin samanaikaisesti on todella hankalaa.

Seuraavassa esitetyt mittaustulokset on redusoitu mittamuuntajien kertoimilla.

#### 4.1.2 TAKO1-kojeiston mittaustulokset

Taulukko 2. TAKO 1 kojeiston kuormitustilanteen mittaustulokset

MITATUT ARVOT								
Lähtö	Jännite U [V]	Virta I [A]	Näennäisteho S [kVA]	Loisteho Q [kvar]	Pätöteho P [kW]	Cos φ	ind/kap	Lähdön kuvaus
1	5075	58,1	471	195	429	0,91	ind	O-muuntaja
2	5075	45,0	375	255	276	0,73	ind	P-muuntaja
3								Huoltomuuntaja
4	5065	196,2	1719	972	1413	0,83	ind	S-muuntaja
5	5095							T-muuntaja
6	5090	533,2	4686	4686	0	0,03	kap	Kompensointi
7								Mittaus
8	5080	240,8	1900	1520	1080	0,66	ind	TAKO4 yhteys
9								Generaattori T2
10								Kiskokatkaisija
11								Mittaus
12	5080	109,6	1146	795	603	0,60	kap	F-muuntaja
13	5090	288,8	2526	1554	1998	0,79	ind	E- ja R-muuntaja
14	5095	57,3	466	334	322	0,70	ind	KK3-muuntaja
15	5095	182,0	1584	930	1293	0,81	ind	Y-muuntaja
16	5090	37,7	309	201	231	0,76	ind	C-muuntaja
17	5070	221,9	1932	1224	1506	0,78	ind	A- ja K-muuntaja
18								TAKO3 yhteys

TAKO1-kojeiston mittauksissa ei ilmennyt mitään poikkeavaa. Muuntajien kuormitus oli järjestäen alle nimellistehon. Huomio kiinnittyi lähinnä osassa lähdöistä ilmenneihin huomattaviin loistehoihin.

F-muuntajan kuormitus oli suurimmalta osin loiskuormaa. Myös TAKO4:n yhteydessä siirtyi loistehoa enemmän kuin pätötehoa. Muiden lähtöjen osalta kuormituksen tehokerroin vastaa tyypillistä tehokerrointa moottorikuormitukselle.

#### 4.1.3 TAKO2-kojeiston mittaustulokset

Taulukko 3. TAKO2-kojeiston kuormitustilanteen mittaustulokset

MITATUT ARVOT								
Lähtö	Jännite U [V]	Virta I [A]	Näennäisteho S [kVA]	Loisteho Q [kvar]	Pätöteho P [kW]	Cos φ	ind/kap	Lähdön kuvaus
1	5060	411,3	3570	1260	3390	0,95	kap	TAKO4 yhteys
2								Mittaus
3								TAKO3 yhteys
4	5070	73,2	636	374	516	0,81	ind	CTMP-jauhin
5								Koivujauhin
6	5065	417,9	3664	3664	88	0,03	kap	Kompensointi
7	5055	122,2	1050	597	852	0,81	ind	M-muuntaja
8	5070	186,8	1641	966	1317	0,81	ind	L-muuntaja
9	5060	45,6	396	233	318	0,81	ind	Mäntyjauhin 2
10	5075	52,0	455	255	383	0,83	ind	Mäntyjauhin 1

TAKO2 kojeiston tehokertoimien mittauksissa ei ilmennyt mitään erityistä.

Kuormitukset olivat tehokertoimeltaan normaaleja ja kaikin osin nimellistehojen kannalta turvallisella puolella.

#### 4.1.4 TAKO3-kojeiston mittaustulokset

Taulukko 4. TAKO3-kojeiston kuormitusilanteen mittaustulokset

MITATUT ARVOT								
Lähtö	Jännite U [V]	Virta I [A]	Näennäisteho S [kVA]	Loisteho Q [kvar]	Pätöteho P [kW]	Cos φ	ind/kap	Lähdön kuvaus
1	5095	969,0	8475	2575	8075	0,95	ind	Yhteys PM3
2								Yhteys TAKO2
3								Yhteys TAKO1
4								Mittaus
5	5095	20,2	147	108	99	0,67	ind	VC-muuntaja
6	5100	46,5	363	270	252	0,71	ind	N-muuntaja
7	5105	96,8	846	606	591	0,70	ind	Q-muuntaja
8	5105	117,4	1029	828	615	0,60	ind	X-muuntaja
9	5100	82,9	723	552	465	0,64	ind	Z-muuntaja
10	5100	162,8	1413	981	1038	0,73	ind	G-muuntaja
11	5095	523,7	4590	4590	114	0,04	kap	Kompensointi
12	5095	105,6	924	558	756	0,80	ind	D-muuntaja
13	5100	70,2	609	399	462	0,76	ind	J-muuntaja
14	5095	47,9	419	324	267	0,63	ind	Hiokejauhin KK3
15	5100	64,8	567	333	459	0,81	ind	PKH esijauhin
16	5095	53,7	471	363	306	0,64	ind	KK1 CTMP-jauhin
17	5100	112,1	954	321	900	0,94	ind	KK1käyttö-muuntaja
18	5085	102,2	873	570	660	0,76	ind	W-muuntaja
19	5100	117,8	1032	729	729	0,71	ind	I-muuntaja
20	5100	49,2	420	219	357	0,83	ind	VB-muuntaja

TAKO3 kojeiston mittaustulokset ovat tehojen puolesta kunnossa. Tehokertoimet ovat osassa lähtöjä huomattavan huonoja. Tehokertoimen arvo 0,70 tarkoittaa sitä, että loistehon ja pätötehon määrät ovat yhtä suuret. Mikäli tehokerroin on alle 0,70, on siirretyn loistehon määrä suurempi kuin siirretyn pätötehon määrä. Siirrettyyn energiaan nähden kaapelointien tulee olla suhteettoman paksuja, ja häviöitäkin syntyy enemmän verrattuna pelkän pätötehon siirtoon.



#### 4.1.5 TAKO4-kojeiston mittaustulokset

Taulukko 5. TAKO4-kojeiston kuormitustilanteen mittaustulokset

MITATUT ARVOT								
Lähtö	Jännite U [V]	Virta I [A]	Näennäisteho S [kVA]	Loisteho Q [kvar]	Pätöteho P [kW]	Cos $\varphi$	ind/kap	Lähdön kuvaus
1								ALAKOSKI-yhteys
2								Varalla
3								Varalla
4								Varalla
5								Varalla
6								Varalla
7								Varalla
8								Kiskokatkaisija
9								Mittaus
10	5055	234,0	2040	1560	1280	0,58	ind	TAKO 1-yhteys
11	5050	427,6	3660	1140	3480	0,95	kap	TAKO 2-yhteys
12	5060	561,2	4700	1300	4580	0,97	kap	PM1 Yhteys
13	5045	124,1	1050	696	792	0,75	ind	B- ja H-muuntaja
14	5055	59,6	510	130	492	0,97	ind	VA-muuntaja
15	5060	122,6	1056	618	861	0,81	ind	U-muuntaja

TAKO4-kojeiston mittaustulokset eivät olleet miltei osin poikkeuksellisia tai muuten huomiota herättäviä. Kaikki kuormitukset olivat teholtaan ja tehokertoimiltaan kunnossa. Tehokertoimet vastasivat tyypillistä moottorikuormaa. TAKO1:n yhteys oli tehokertoimeltaan huomattavan huono. Yhteydellä siirrettiin merkittävästi enemmän loistehoa kuin pätötehoa.

## 4.2 Loistehotasapaino ja kompensointiparistojen kuormitustilanne

Tämän työn mittaustulosten perusteella ei voi antaa luotettavaa vastausta verkon loistehotasapainosta. Kuormituksen kasvaessa loistehotarve lisääntyy ja kuormituksen pienentyessä loistehoa tarvitaan vähemmän. Mittaushetkellä kuormitus oli lähellä maksimia, koska kaikki kolme kartonkikokonetta olivat tuotannossa. Edellisestä johtuen tehtaan loistehon tarve ei juuri kasva mittaushetkisestä tilanteesta. Mittauskytkentä on esitetty luvussa 4.1.1.

Mittauksien avulla voidaan kuitenkin tarkastaa verkon loistehon kompensointiin käytettyjen kompensointiparistojen tuottaman loistehon riittävyys mittaushetkellä. Kompensointiin käytetään myös T5-tahtigeneraattoria, joten tehtaan sähköverkon kompensointi ei ole pelkästään kompensointiparistojen varassa.

Takon kompensointiparistojen kilpitiedot on esitettynä seuraavassa taulukossa.

Taulukko 6. Kompensointiparistojen tekniset tiedot

Kenno	$S_n$ [MVar]	$U_n$ [kV]	$I_n$ [A]	$C$ [μF]	Tyypimerkintä
TAKO 1 6	4,90	5,25	550	543	24PSLP 7,44Mvar/6,6kV/50Hz
TAKO 2 6	3,50	5,10	400	424,4	12PILP 3,60Mvar/5,2kV
TAKO 3 11	4,50	5,10	539	526,2	18PILP 5,40Mvar/5,7kV

Tehtaan loistehotasapaino oli mittaushetkellä seuraava:

Kuormitusten loisteho:	17420 kvar ind
Kompensointi:	12940 kvar kap
Syöttävä verkko:	1275 kvar ind

Jotta tulokseksi saataisiin tasapainotila, on edellisistä puuttuva loisteho tuotettava 14000 kVA:n T5 tahtigeneraattorilla, jonka tuottama loisteho oli mittaushetkellä 5755 kvar kap.

Mittaustulosten perusteella voidaan sanoa kompensoinnin olleen kunnossa mittaushetkellä. Kompensointiparistojen automatiikan toimintaan tai huoltojen ajankohtaisuuteen ei tämän työn puitteissa ole mahdollista puuttua.

### **4.3 Mittaustulosten tarkastelu**

Mittaukset sujuivat kaiken kaikkiaan ongelmitta. Fluke 43 -mittarin kanssa oli hieman käyttäjästä aiheutuvia ongelmia. Mittari menee virrankatkaisun jälkeen oletuksena olevaan yksivaiheiseen tilaan, jolloin luonnollisesti kolmivaiheiset mittaukset eivät anna oikeita tuloksia. Osa mittauksista jouduttiin näistä syistä tekemään kahteen kertaan.

Osassa lähdöistä esiintyi huomattavia määriä loistehoa. Verkon rakenne on kuitenkin sellainen (kaapeloinnit lyhyitä), että loistehon aiheuttamat häviöt ovat pieniä. Kuormituksen lisäyksen kannalta voisi olla kuitenkin järkevää paneutua verkon loistehoihin ja niiden pienentämiseen. Kaapeleiden ja muuntajien kuormituksen määrää näennäisteho ja kokonaisvirta, joten loistehoa pienentämällä voitaisiin kuormitusta lisätä enemmän kuin nykytilanteessa.

Loistehojen ja huonojen tehokertoimien selittäminen on tämän työn mittausten perusteella hankalaa, sillä tässä työssä ei pureuduta varsinaisiin syihin, vaan etsitään mahdollisia ongelmia. Tehokertoimien huonot arvot ovat 500V:n IT-verkossa hieman outoja. Verkossa ei ole esimerkiksi kompensoimatonta valaistuskuormaa, vaan käytännössä ainoastaan moottorikuormitusta. Moottoreiden tehokerroin on tyypillisesti yli 0,7, poikkeuksiakin löytyy, mutta 0,6:n tehokerroin ei ole helposti selitettävissä moottoreiden avulla.

Takon kartonkitehtaalla on tehty edellinen kuntokartoitus vuonna 1994 Jouni Luukkosen toimesta. Nykytilanteen kuormitusten tehokertoimien vertaaminen 1994 tasoon ei ole mielekästä kaikkien lähtöjen osalta, sillä verkon rakenne on muuttunut. Huonoimpien tehokertoimien lähtöjä ei edes ollut olemassa vuonna 1994, joten tarkastelu osoittautui mahdottomaksi.

## 5 VIKAVIRRAT

Tässä luvussa käsitellään M-real Oyj Tako Board - kartonkitehtaan keskijänniteverkon oikosulkuvirrat. Työn tilaajan kannalta maasulkuvirtojen käsittely ei ollut mielekästä, joten ne jätetään tämän työn ulkopuolelle.

Oikosulkuvirtojen tunteminen on erittäin tärkeää verkon suojauksen ja komponenttien mitoituksen kannalta. Liian pieni oikosulkuvirta voi aiheuttaa tilanteen, jossa suojat eivät havaitse todellista vikatilannetta. Toisaalta liian suuri oikosulkuvirta voi aiheuttaa liian suuria taloudellisia investointeja, mikäli halutaan saada verkko täyttämään viranomaisten asettamat määräykset.

Prosessiteollisuudessa kuormitusten laatu on pääsääntöisesti pyöriviä koneita, mutta osa prosessien vaatimasta lämmityksestä ja kuivauksesta suoritetaan myös sähköllä. Pyörivien koneiden edustaessa pääosaa kuormituksesta oikosulkuvirran riittävyys ei ole pääsääntöisesti ongelma, sillä oikosulkuilanteissa moottorit toimivat generaattoreina tuottaen verkkoon oikosulkuvirtaa liike-energiastaan. /4/

### 5.1 Oikosulku

Oikosulku on tilanne, jossa kaksi tai useampi eri potentiaalissa olevaa pistettä kytkeytyvät yhteen eristysvian johdosta. Yksivaiheinen oikosulku tarkoittaa tilannetta, jossa nollajohdin ja vaihejohdin pääsevät kosketuksiin eristysvian takia. Monivaiheinen oikosulku tapahtuu, jos eristysvika koskettaa useampaa kuin yhtä vaihetta samanaikaisesti.

Oikosulku ei ole laitteiston toiminnan kannalta normaali käyttötilanne, mutta mitoitettaessa sähkölaitteistoa on oikosulkuun varauduttava, ja sen vaikutukset laitteistolle on pyrittävä minimoimaan. Sähköverkon mitoituksessa on huomioitava, että verkon komponentit kestävätkä oikosulun aiheuttamat termiset ja dynaamiset rasitukset. /3/

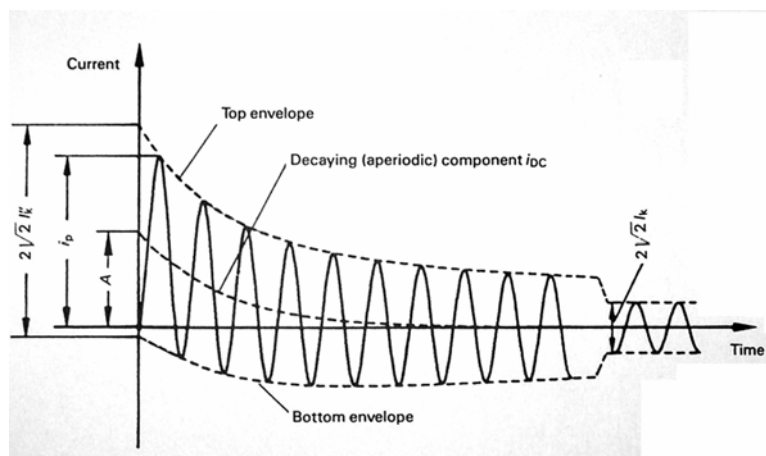
Koska oikosulkuvirta on suuruudeltaan huomattavasti suurempi kuin normaalin käyttötilanteen virta, aiheuttaa se pitkäaikaisena laitteistolle hyvin suurella todennäköisyydellä vaurioita. Sähköturvallisuusmääräykset vaativat sähköverkon varustamista sellaisilla laitteilla, jotka katkaisevat oikosulkuvirran itsenäisesti riittävän nopeasti ja varmasti. /3/

## 5.2 Oikosulkuvirran luonne

Oikosulkuvirta voi olla kolmivaiheisissa järjestelmissä eri vaiheissa samaan aikaan sekä symmetrinen että epäsymmetrinen. Symmetrinen oikosulkuvirta tarkoittaa tilannetta, jossa oikosulkuvirtaan ei kuulu tasakomponenttia. Epäsymmetrisessä tapauksessa oikosulkuvirrassa on mukana vaimeneva tasakomponentti, joka aiheutuu piirin reaktanssista ja oikosulun kytkentähetkestä. /4/

Mikäli oikosulku tapahtuu kaukana generaattoreista ja pyörivistä moottoreista, on oikosulkuvirran vaihtokomponentin amplitudi suuruudeltaan vakio. Käyrämuotoa voi siis muuttaa tässä tilanteessa ainoastaan oikosulun kytkentähetkestä johtuva tasakomponentti. /4/

Tarkasteltavassa sähköverkossa on teollisuudelle ominaiseen tapaan huomattava määrä pyöriä moottoreita ja myös omaa sähkön tuotantoa. Oikosulun tapahtuessa lähellä generaattoreita ja moottoreita oikosulkuvirran luonne muuttuu huomattavasti verrattuna tilanteeseen, jossa etäisyys generaattoreihin ja moottoreihin on suuri.



Kuva 3. Oikosulkuvirran kuvaaja

Kuvassa 3 näkyy oikosulkuvirran kuvaaja tapauksessa, jossa oikosulku tapahtuu lähellä generaattoreita ja pyöriviä moottoreita. Alkuoikosulkuvirta  $I_k''$  on huomattavasti suurempi kuin jatkuvan tilan oikosulkuvirta  $I_k$ . Kytkenähetkestä aiheutuvaa tasakomponenttia on kuvattu termillä  $i_{DC}$ . Alkuoikosulkuvirran arvo vastaa generaattoreiden ja moottoreiden reaktansseja vian alkuhetkellä. Vian jatkuessa reaktanssit kasvavat ja oikosulkuvirta vaimenee jatkuvantilan arvoon. /4/

### 5.3 Oikosulkulaskennan komponentit

Oikosulkuvirtojen laskennassa on tiedettävä laskettavasta sähköverkosta tiettyjä ominaisuuksia. Syöttävän verkon osalta on tiedettävä verkon oikosulkuteho ja kolme- sekä kaksivaiheinen oikosulkuvirta. Kaapeleiden, muuntajien, generaattoreiden ja moottoreiden osalta tulee tietää niiden sähköiset arvot. Tässä luvussa esitetään oikosulkulaskennan kannalta tärkeät komponenttiarvot sekä niiden laskemiseen tarvittavat yhtälöt.

#### 5.3.1 Syöttävä verkko

Syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi  $Z_k$  saadaan laskettua verkon oikosulkuvirtojen avulla. Takoa syöttävän liittymän oikosulkuvirta riippuu Tampereen kaupungin sähkölaitoksen Takoa syöttävästä 20 kV:n kiskostosta. Sen alkuoikosulkuvirta on tällä hetkellä normaalissa käyttötilanteessa 8,92 kA ja kaksivaiheinen oikosulkuvirta 6,93 kA. Luvut on saatu Tampereen sähköverkko oy:ltä, ja edustavat suurimpia esiintyviä oikosulkuvirtoja normaalikäyttötilanteessa.

Arvot ovat syöttävän verkon arvoja ja eivät sisällä Takon oman verkon pyöri-  
vien koneiden aiheuttamia oikosulkuvirtoja. Arvot huomioivat taustaverkon aiheuttaman  
lisän oikosulkuvirtaan. Tampereen sähköverkko Oy:n XPOWER-ohjelmalla tekemän  
laskelman mukaan oikosulkuvirta olisi hieman pienempi. Ohjelma ei ota huomioon  
taustaverkon vaikutusta oikosulkuvirtaan, vaan olettaa generaattoreiden sijaitsevan  
kaukana vikapaikasta. Syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi voidaan laskea edellä  
mainittujen arvojen avulla seuraavasti:

$$Z_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k''} \quad /4/, \text{ missä} \quad (1)$$

$c$  = Jännitteen korjauskerroin

$U_n$  = Verkon nimellispääjännite

$I_k''$  = Alkuoikosulkuvirta

Kaavassa esiintyvän jännitteen korjauskertoimen määrittäminen tapahtuu IEC 909:n mukaan seuraavasti:

Taulukko 7. Jännitteen korjauskertoimen määrittäminen /4/

Nimellisjännite $U_n$	Jännitteen korjauskerroin $c$	
	Maksimioikosulkuvirta $C_{max}$	Minimioikosulkuvirta $C_{min}$
Pienjännite 100 V – 1000 V		
a) 230 V / 400 V	1,00	0,95
b) Muut jännitteet	1,05	1,00
Keskijännite >1 kV – 35 kV	1,10	1,00
Suurjännite >35 kV – 230 kV	1,10	1,00

Alle 35 kV jännitteillä laskettaessa, mikäli oikosulkuimpedanssin tarkkoja komponentteja ei tiedetä, voidaan olettaa komponenttiarvojen suhteet seuraaviksi:

$$R_k = 0,1 \cdot X_k \quad \text{ja} \quad X_k = 0,995 \cdot Z_k \quad /4/ \quad (2)$$

Takon Keskijänniteverkkoa syöttävän 20 kV:n verkon oikosulkuutilanteen impedanssi saadaan lisäämällä syöttökaapeleiden impedanssit verkon oikosulkuimpedansseihin.

Syöttävän verkon ominaisoikosulkuteho  $S_k''$  voidaan laskea kahdella eri tavalla sen mukaan, tunnetaanko verkon alkuoikosulkuimpedanssi vai oikosulkuvirta. Laskentaan tarvittavat kaavat ovat esitettyinä seuraavassa. /4/

$$S_k'' = \frac{c \cdot U_n^2}{Z_k''}, \text{ mikäli tunnetaan alkuoikosulkuiмпedanssi.} \quad (3)$$

$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k'', \text{ mikäli tunnetaan verkon alkuoikosulkuvirta.} \quad (4)$$

Kaavojen merkinnät:

$S_k''$  = Syöttävän verkon ominasioikosulkuteho

$U_n$  = Verkon nimellispääjännite

$Z_k''$  = Verkon oikosulkuiмпedanssi

$I_k''$  = Verkon oikosulkuvirta

$c$  = Jännitekerroin

Syöttävän verkon oikosulkuvirta ei muutu oikosulun keston muuttuessa, toisin kuin moottorien aiheuttama oikosulkuvirran komponentti. Syöttävän verkon oikosulkuvirralla pätee:

$$I_{k(\text{ilman moottoreita})} = I_{k(\text{ilman moottoreita})}'' / 4 \quad (5)$$

### 5.3.2 Muuntajat

Kaksikäämuuntajille oikosulkuiмпedanssi ja sen osatekijät voidaan laskea muuntajan kilpitietojen perusteella. Muuntajan oikosulkuiмпedanssi  $Z_k$ , -reaktanssi  $X_k$ , ja -resistanssi  $R_k$  voidaan laskea seuraavasti.

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \text{ tai } Z_T = \frac{z_{k\%}}{100\%} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} / 4 \quad (6)$$

$$R_T = \frac{r_{k\%}}{100\%} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{P_k}{3 \cdot I_n^2} / 4 \quad (7)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} / 4 \quad (8)$$



Kaavoissa seuraavat merkinnät

- $u_{kr}$  = Muuntajan oikosulkujännite prosentteina
- $U_n$  = Muuntajan nimellispääjännite (ensiö tai toisio)
- $z_{k\%}$  = Muuntajan oikosulkureaktanssi prosentteina
- $S_n$  = Muuntajan nimellisnäennäisteho
- $r_{k\%}$  = Muuntajan oikosulkuresistanssi prosentteina
- $P_k$  = Muuntajan kokonaiskuparihäviöteho
- $I_n$  = Muuntajan nimellisvirta

Muuntajan arvot voivat olla joko ensiötasossa tai toisiotasossa, mutta kaikkien arvojen, paitsi tehojen, on oltava saman jännitetason arvoja. Muuntajan ensiön jännitetasosta toisio jännitetasoon impedanssin redusointi tapahtuu käyttäen hyväksi muuntajan muuntosuhdetta seuraavasti.

$$Z'_k = \frac{1}{\mu^2} \cdot Z_k \quad /3/, \text{ missä} \quad (9)$$

- $Z'_k$  = Redusoitu impedanssi
- $\mu$  = Muuntajan muuntosuhde ensiöstä toisioon

Muuntajan oikosulkuteho  $S_{kT}$  voidaan laskea muuntajan nimellistehon ja oikosulkureaktanssin avulla seuraavasti:

$$S_{kT} = \frac{U_n^2}{Z_k} = \frac{S_n}{z_k} \quad /3/, \text{ missä} \quad (10)$$

- $U_n$  = Muuntajan nimellispääjännite
- $z_k$  = Muuntajan oikosulkureaktanssin suhtellinen arvo
- $S_n$  = Muuntajan nimellisnäennäisteho
- $Z_k$  = Oikosulkuimpedanssi vaihetta kohti

Teollisuusverkoissa muuntajien osuus kokonaisuikosulkuimpedanssista on suuri, koska kaapeliyhteydet ovat lyhyitä.

### 5.3.3 Kaapelit ja kiskot

Kaapeleiden impedanssit saadaan laskettua valmistajien antamien kaapeleiden resistanssi- ja reaktanssiarvojen perusteella. Kaapelivalmistajat antavat arvot pituusyksikköä kohden, yleensä pituusyksikkönä käytetään kilometriä. Kaapelin impedanssi saadaan laskettua seuraavasti:

$$Z_J = (r + jx) \cdot l \quad /4/, \text{ missä} \quad (11)$$

$r$  = kaapelin resistanssi pituusyksikköä kohti

$x$  = kaapelin reaktanssi pituusyksikköä kohti

$l$  = Kaapelin pituus

Kaapeleiden resistanssi ei teollisuusverkoissa ole kovinkaan merkittävä oikosulkuvirtojen kannalta, koska kaapeliyhteydet ovat lyhyitä.

Kiskostojen reaktanssina laskennassa voidaan käyttää arvoa  $0,15 \text{ m}\Omega/\text{m}$ . /3/

### 5.3.4 Kondensaattorit

Oikosulun tapahtumahetkestä ja tapahtumapaikasta huolimatta voidaan rinnakkaiskompensointiparistot jättää pois oikosulkuvirtojen laskennasta.

Kondensaattoriparistoon on varastoitunut niin pieni energiamäärä, että sen vaikutus oikosulkuvirtaan olisi minimaalinen.

### 5.3.5 Tahtikoneet

Tahtimoottoreiden ja tahtigeneraattoreiden käyttäytyminen oikosulkutilanteessa on laskennan kannalta yhtenevää, joten generaattorin ja moottorin oikosulkuimpedanssi voidaan laskea samasta yhtälöstä. Seuraavassa on esitettyä tahtikoneen myötäimpedanssin  $Z_{KG}$  laskentakaava.

$$Z_{kG} = K_G \cdot Z_G = K_G \cdot (R_G + jX_d'') / 4 \quad (12)$$

Impedanssin korjauskerroin  $K_G$  voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \cdot \sin(\varphi_{rG})} / 4 \quad (13)$$

Kaavoissa seuraavat merkinnät:

$c$  = jännitteen korjauskerroin

$U_n$  = Nimellispääjännite

$U_{rG}$  = Tahtikoneen nimellispääjännite

$x_d''$  = Generaattorin alkureaktanssin arvo prosentteina

$X_d''$  = Generaattorin alkureaktanssi

$\varphi_{rG}$  = Tahtikoneen nimellisvirran ja -pääjännitteen välinen vaihekulma

$Z_G$  = Tahtikoneen impedanssi

$Z_{kG}$  = Tahtikoneen korjattu impedanssi

Mikäli tahtikoneen alkureaktanssia  $X_d''$ , muutosreaktanssia  $X_d'$ , ja tahtireaktanssia  $X_d$  ei tiedetä, voidaan ne laskea suhteellisten arvojen perusteella. Laskentaan tarvittavat kaavat on esitetty seuraavassa.

$$X_d'' = \frac{x_d''}{100\%} \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} / 4 \quad (14)$$

$$X_d' = \frac{x_d'}{100\%} \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} / 4 \quad (15)$$

$$X_d = \frac{x_d}{100\%} \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} / 4 \quad (16)$$

Kaavoissa seuraavat merkinnät:

$U_{nG}$  = Tahtikoneen nimellispääjännite

$S_{nG}$  = Tahtikoneen nimellinäennäisteho

$x_d''$  = Generaattorin alkureaktanssin arvo prosentteina

$x_d'$  = Generaattorin muutosreaktanssin arvo prosentteina

$x_d$  = Generaattorin tahtireaktanssin arvo prosentteina

Tahtikoneiden, joiden nimellispääjännite on yli 1 kV ja nimellinäennäisteho alle 100 MVA, voidaan olettaa oikosulkuresistanssin olevan riittävällä tarkkuudella:

$$R_d = 0,07 \cdot X_d'' / 4/ \quad (17)$$

Mikäli nimellinäennäisteho on yli 100 MVA, voidaan oikosulkuresistanssista olettaa:

$$R_d = 0,05 \cdot X_d'' / 4/ \quad (18)$$

Tahtikoneen ominaisoikosulkuteho voidaan laskea käyttäen hyväksi tahtikoneen nimellistehoa ja tahtireaktanssin suhteellista lukuarvoa seuraavasti:

$$S_{kG} = \frac{S_{nG}}{x_d} / 3/, \text{ missä} \quad (19)$$

$S_{nG}$  = Tahtikoneen nimellinäennäisteho

$x_d$  = Generaattorin tahtireaktanssin arvo prosentteina

Tahtikoneen pysyvän tilan oikosulku virta  $I_k$  saadaan laskettua koneen pysyvän tilan sähkömotorisen voiman avulla seuraavasti:

$$I_k = \frac{U_{nG} + jX_d \cdot I}{\sqrt{(R_d + R_n)^2 + (X_d + X_n)^2}} /6/, \text{ missä} \quad (20)$$

$U_{nG}$  = Tahtikoneen nimellisvaihejännite

$X_d$  = Generaattorin tahtireaktanssi

$R_d$  = Generaattorin resistanssi

$R_n$  = Generaattorin ja vikapaikan välinen resistanssi

$X_n$  = Generaattorin ja vikapaikan välinen reaktanssi

$I$  = Generaattorin kuormitusvirta ennen oikosulkua

### 5.3.6 Epätahtikoneet

Epätahtimoottoreiden oikosulkuimpedanssi  $Z_M$  saadaan laskettua moottorin kilpitietojen perusteella seuraavasti:

$$Z_M = \frac{1}{\frac{I_s}{I_n}} \cdot \frac{(U_n)^2 \cdot \eta \cdot \cos \varphi}{P_n} /4/, \text{ missä} \quad (21)$$

$I_s$  = Moottorin käynnistysvirta

$I_n$  = Moottorin nimellisvirta

$U_n$  = Moottorin nimellispääjännite

$P_n$  = Moottorin nimellispäätöteho

$\eta$  = Moottorin hyötysuhde

$\cos \varphi$  = Moottorin tehokerroin

Oikosulkuimpedanssin tekijät, mikäli eivät ole tiedossa, voidaan määrittää pienjännitemoottoreille riittävällä tarkkuudella seuraavasti:

$$X_M = 0,922 \cdot Z_M \text{ ja } R_M = 0,42 \cdot X_M /4/ \quad (22)$$

Suurjännitemoottoreille, joiden teho on alle 1 MW voidaan käyttää:

$$X_M = 0,989 \cdot Z_M \text{ ja } R_M = 0,15 \cdot X_M /4/ \quad (23)$$

### 5.3.7 Epätahtikoneryhmät

Pienjännitteeseen kytketyt epätahtikoneet syöttävät oikosulkuvirtaa muuntajan ensipuolella tapahtuvaan oikosulkuun. Oikosulun tapahtuessa pienjänniteverkossa ei muiden jakelumuuntajien syöttämiä moottoriryhmiä tarvitse huomioida. Suoraan keskijänniteverkkoon kytketyt epätahtimoottorit syöttävät luonnollisesti oikosulkuvirtaa vikapaikkaan, ja ne tulee käsitellä laskennassa yksilöllisesti.

Pienjännite moottoriryhmän huomioiminen keskijänniteverkon puolella tapahtuvassa oikosulussa on tarpeellista, mikäli seuraava yhtälö ei toteudu.

$$\frac{\sum P_{nM}}{\sum S_{nT}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{c \cdot 100 \cdot \sum S_{nT}}{S_k''} - 0,3 \right|} /4/, \text{ missä} \quad (24)$$

$\sum P_{nM}$  = Moottorien nimellispätehtöjen summa

$\sum S_{nT}$  = Moottoreita syöttävien muuntajien nimellinäennäisteho

$S_k''$  = Alkuoikosulkuteho vikapisteessä ilman moottoreita

$c$  = Jännitteen korjauskerroin

Pienjännitemoottoriryhmän oikosulkuimpedanssin laskeminen huomioimalla jokainen moottori erikseen on erittäin työlästä, koska täsmällisen moottorien tyyppien ja kilpitietojen selvittämien olisi liian iso työ hyötyynsä nähden.

Pienjännitemoottoriryhmän oikosulkuimpedanssi kannattaa määrittää moottorien summatehoja hyödyntäen. Oikosulkuimpedanssi saadaan laskettua vastaavasti, kuin yhden epätahtimoottorin tapauksessa, edellisessä luvussa.

Prosessiteollisuudelle on luonteenomaista, että lähes kaikki kuormitus on moottorikuormaa, joten pienjännitemoottoriryhmiä laskettaessa voidaan olettaa, että lähdoissa ei esiinny muuta kuormitusta lainkaan. Näin laskemalla oikosulkuvirran alkuarvo tulee hieman suuremmaksi kuin todellisuudessa. Moottoriryhmät saadaan muodostettua mittausten perusteella, kun tiedetään lähtöjen virrat, tehokertoimet ja tehot.

### 5.3.8 Sysäysoikosulkuvirta

Sysäysoikosulkuvirtaa, eli oikosulkuvirran suurinta mahdollista huippuarvoa, laskettaessa impedanssien resistiivisen- ja reaktiivisen komponentin suhteen avulla määritetään oikosulkuvirralla sysäyskerroin  $\kappa$ . sysäyskerroin voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3R/X} / 4, \text{ missä} \quad (25)$$

$\kappa$  = Sysäyskerroin

$R$  = Impedanssin resistiivinen komponentti

$X$  = Impedanssin reaktiivinen komponentti

Sysäysoikosulkuvirta lasketaan sysäyskerroimen avulla seuraavasti:

$$i_s = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' / 4, \text{ missä} \quad (26)$$

$I_k''$  = Kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta

$\kappa$  = Sysäyskerroin

### 5.3.9 Terminen oikosulkuvirta

Sähköverkon komponenttien terminen oikosulkukestoisuus oikosulkuvirran aiheuttaman lämpenemän perusteella. Oikosulkuvirran suuruus ei ole vakio koko oikosulun ajan. Oikosulkuvirran aiheuttama lämpenemä lasketaan alkuoikosulkuvirran tehollisarvon avulla. Yhden sekunnin keskimääräistä oikosulkuvirtaa vastaa terminen oikosulkuvirta  $I_{1s}$ . Termisen oikosulkuvirran aiheuttama lämpenemä on yhtä suuri kuin todellisen, muuttuvan, oikosulkuvirran aiheuttama lämpenemä. /6/

Terminen oikosulkuvirta lasketaan kaavalla:

$$I_{1s} = I_k'' \sqrt{(m+n)t_k} / 6/, \text{ missä} \quad (27)$$

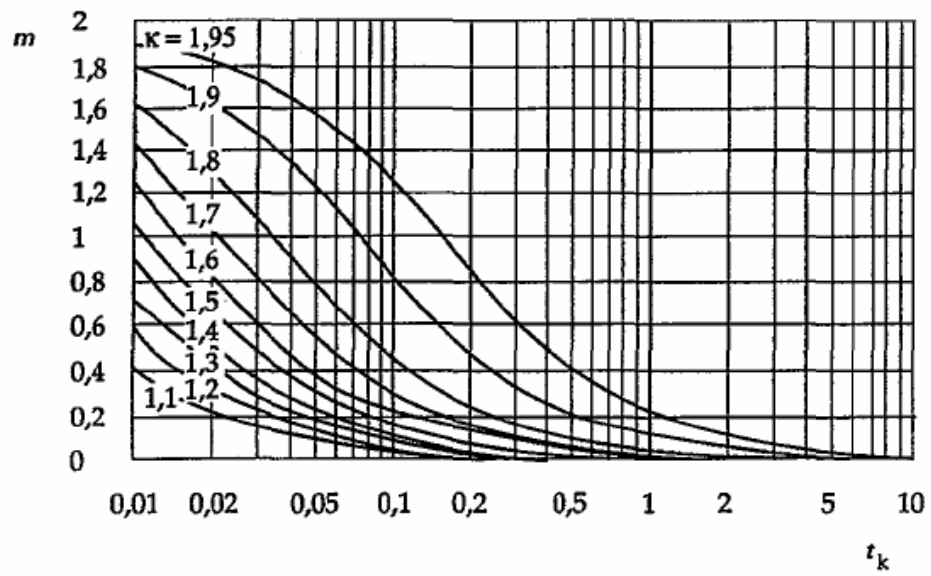
Kaavassa merkinnät:

$I_k''$  = Kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta  
 $m$  = Tasavirtatekijä  
 $n$  = Vaihtovirtatekijä  
 $t_k$  = Vian kesto aika

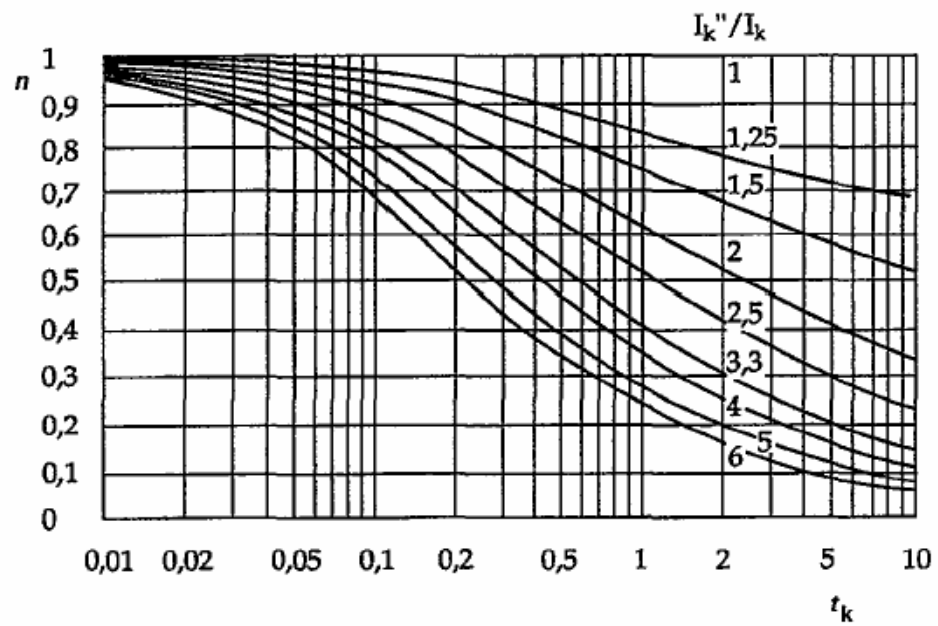
Tasavirtatekijällä  $m$  otetaan huomioon oikosulkuvirran tasakomponentin vaimeneminen. Tasavirtatekijän kertoimen arvo riippuu sysäyskertoimesta ja oikosulun kestoajasta. Vaihtovirtatekijällä  $n$  taas otetaan huomioon oikosulkuvirran vaihtokomponentin vaimeneminen. Kertoimen arvo riippuu pysyvän tilan oikosulkuvirran ja alkuoikosulkuvirran suhteesta.

Oikosulkuvirran terminen vaikutus riippuu vian kestoajasta. Todellinen kesto aika on pienempi kuin tässä työssä laskennassa käytettävä yhden sekunnin kesto aika. Edellisestä joten kojeiston voidaan olettaa kestävän lyhyemmän ajan kestävän oikosulun, mikäli ne kestäisivät yhden sekunnin oikosukunkin.





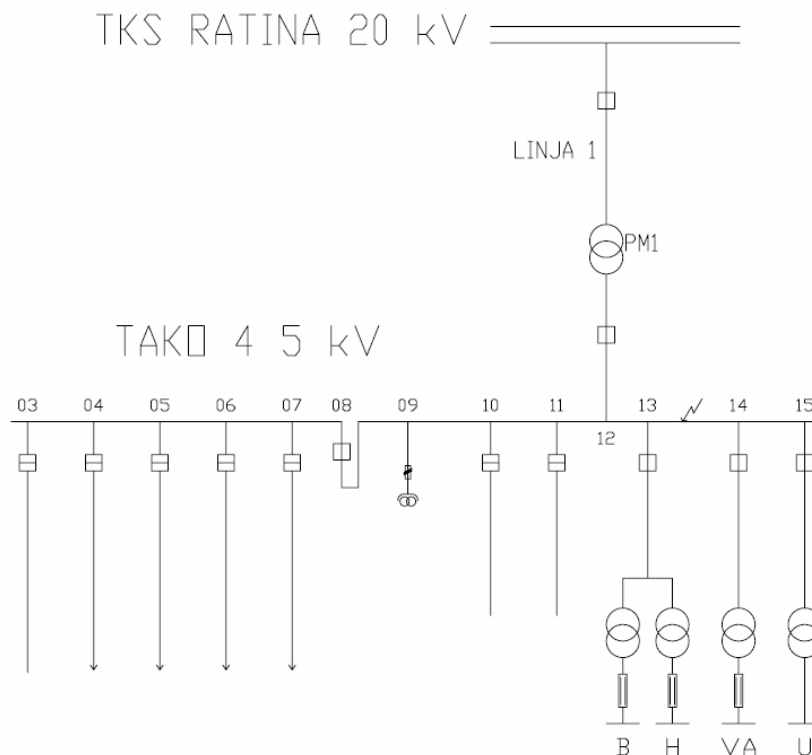
Kuva 4. Tasavirtatekijän määrittäminen /6/



Kuva 5. Vaihtovirtatekijän määrittäminen /6/

#### 5.4 Oikosulkuvirran laskeminen TAKO4:n pääkiskostossa

Tässä luvussa lasketaan TAKO4:n pääkiskostossa tapahtuvan oikosulun oikosulkuvirtojen  $I_k$ ,  $I_k''$  ja  $i_s$  suuruudet vaihe vaiheelta. Tässä esimerkissä oletetaan, että päämuuntaja PM1 syöttää pelkästään TAKO4:n kiskostoa. Muut kytkinlaitokset lasketaan samoin, joten niiden osalta tulokset esitetään taulukoituna ilman laskuesimerkkejä. Seuraavassa on esitetty kuva laskettavasta tilanteesta.



Kuva 6. Oikosulkuvirran esimerkkilaskun vikatilanne

TAKO4-kytkinlaitosta syöttää linjan 1 päämuuntaja PM1. Syöttävän verkon impedanssi saadaan laskettua kaavan (1) avulla. Jännitteen korjauskertoimena käytetään arvoa  $c=1,1$ , koska halutaan laskea maksimioikosulkuvirta. Kaavaan tarvitaan verkon alkuoikosulkuvirta, joka voidaan laskea tunnetun ominaisoikosulkutehon avulla kaavan (4) mukaan seuraavasti:

$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k''$$

Yhdistämällä edellinen ja kaava (1) saadaan:

$$Z_k = \frac{c \cdot (U_n)^2}{S_k''}$$

Impedanssin redusoiminen muuntajan toisiopuolelle tapahtuu muuntosuhteiden avulla seuraavasti:

$$Z_{k5kv} = \frac{c \cdot (U_n)^2}{S_k''} \cdot \frac{1}{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2}$$

Syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi TAKO4-kiskostossa voidaan nyt laskea.

$$|Z_{k5kv}| = \frac{c \cdot (U_n)^2}{S_k''} \cdot \frac{1}{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2} = \frac{1,1 \cdot (20000 \text{ V})^2}{\sqrt{3} \cdot 20000 \text{ V} \cdot 8920 \text{ A}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{20000 \text{ V}}{5000 \text{ V}}\right)^2} = 0,088997 \Omega$$

Kaavan (2) perusteella voidaan jakaa syöttävän verkon impedanssin itseisarvo resistiiviseen ja reaktiiviseen komponenttiin seuraavasti:

$$X_k = 0,995 \cdot Z_k = 0,995 \cdot 0,088997 \Omega = 0,08852 \Omega$$

$$R_k = 0,1 \cdot X_k = 0,1 \cdot 0,08168 \Omega = 0,008852 \Omega$$

Syöttävän verkon kokonaisimpedanssi kompleksisessa muodossa on:

$$\underline{Z}_{k5kv} = (0,008852 + j0,08852) \Omega$$

Linjan 1 kaapelin impedanssi saadaan laskettua kaavan (11) avulla, kun tiedetään kaapelin resistanssi ja reaktanssi pituusyksikköä kohden. Kaapelilinjassa on kaksi kappaletta rinnan kytkettyä 3x185 APYAKMM kaapelia, joiden resistanssi on 87 mΩ / km ja reaktanssi 53 mΩ / km. Kaapelilinjan pituus on 800 m, joten kaapelin impedanssi voidaan laskea seuraavasti:

$$\underline{Z_J'} = (r + jx) \cdot l = \left( 0,087 \frac{\Omega}{\text{km}} + j0,053 \frac{\Omega}{\text{km}} \right) \cdot 0,8 \text{ km} = (0,0696 + j0,0424) \Omega$$

Kaapelin impedanssi pitää redusoida 5 kV tasoon, koska oikosulkuvirta halutaan tietää TAKO4:n pääkiskostossa 5kV puolella.

$$\underline{Z_J} = \underline{Z_J'} \cdot \frac{1}{\mu^2} = (0,0696 + j0,0424) \Omega \cdot \frac{1}{\left( \frac{20000 \text{ V}}{5000 \text{ V}} \right)^2} = (0,00435 + j0,00265) \Omega$$

Muuntajan toisiopuolen ja TAKO4:n pääkiskoston välisen kaapeliyhteyden impedanssi saadaan liitteen 1 tiedoista. Impedanssi on:

$$\underline{Z_{J2}} = (0,0015 + j0,00156) \Omega = 0,00216 \angle 46,03^\circ \Omega$$

Päämuuntajan 1 impedanssi saadaan laskettua kaavan 6 avulla. Muuntajan kilpiarvot on esitetty liitteessä 1. Muuntajan impedanssi saadaan laskettua kilpiarvojen avulla seuraavasti:

$$\left| \underline{Z_T} \right| = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{7,2\%}{100\%} \cdot \frac{(5300 \text{ V})^2}{15 \cdot 10^6 \text{ VA}} = 0,1348 \Omega$$

Muuntajan impedanssin resistiivinen komponentti saadaan laskettua kaavan (7) avulla.

$$R_T = \frac{r_{k\%}}{100\%} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{0,4\%}{100\%} \cdot \frac{(5300 \text{ V})^2}{15 \cdot 10^6 \text{ VA}} = 0,007491 \Omega$$

Muuntajan reaktanssi saadaan laskettua kaavan (8) mukaan:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{(0,1348 \Omega)^2 - (0,007491 \Omega)^2} = 0,13462 \Omega$$

Muuntajan impedanssiksi saadaan:

$$\underline{Z_T} = (0,007491 + j0,13462) \Omega$$

Syötön kokonaisimpedanssi TAKO4-kiskostossa on:

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{k5kV} + \underline{Z}_J + \underline{Z}_{J2} + \underline{Z}_T = (0,021509 + j0,22051) \Omega = 0,22843 \angle 84,42^\circ \Omega$$

Muuntajien U, B ja H kuormituksena voidaan olettaa olevan pelkästään moottoreita. Muuntajan VA kuormitus taas voidaan olettaa pelkästään valaistuskuormaksi, joten sen impedanssia ei tarvitse huomioida oikosulkuvirtoja laskettaessa.

Epätahtimoottoriryhmien käsittely oikosulkuvirtojen laskennassa on esitetty luvussa 6.3.6. B- ja H-muuntajien osalta voidaan olettaa lähdön käsittävän vain moottorikuormaa. Taulukon 5 arvojen perusteella voidaan määrittää ekvivalenttisen moottorin arvot:

$$\begin{aligned} S &= 1050 \text{ kVA} \\ P &= 792 \text{ kW} \\ Q &= 696 \text{ kvar} \\ \cos \varphi &= 0,75 \end{aligned}$$

Pienjännitemoottoriryhmää ei tarvitse huomioida jos yhtälön (23) ehto toteutuu. Molempien muuntajien nimellisnäennäisteho on 2000 kVA ja verkon syöttämän alkuoikosulkuteho saadaan laskettua edellä lasketun syöttävän verkon impedanssin avulla. Tarkastetaan seuraavaksi ehdon toteutumien edellä esitetyillä arvoilla.

Alkuoikosulkuteho TAKO4-kiskostossa saadaan laskettua syöttävän verkon impedanssin avulla kaavalla (3).

$$S_k'' = \frac{c \cdot U_n^2}{Z_k} = \frac{1,1 \cdot (5000 \text{ V})^2}{(0,022843 + j0,22735) \Omega} = 120 \text{ MVA}$$

Nyt voidaan tarkistaa yhtälön (23) toteutuminen B ja H muuntajien osalta.

$$\frac{\sum P_{nM}}{\sum S_{nT}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{c \cdot 100 \cdot \sum S_{nT}}{S_k''} - 0,3 \right|} \Rightarrow \frac{792000 \text{ W}}{4000000 \text{ VA}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{1,1 \cdot 100 \cdot 4000000 \text{ VA}}{124000000 \text{ VA}} - 0,3 \right|}$$

$$\Rightarrow 0,198 \leq 0,238 \Rightarrow \text{tosi}$$

Edellisen perusteella muuntajien B ja H syöttämää alkuoikosulkuvirtaa ei tarvitse huomioida laskennassa. Samalla tavalla laskemalla saadaan U muuntajalle tulokseksi:

$$0,4305 \leq 0,5217 \Rightarrow \text{tosi}$$

Edellisen perusteella kaikki muuntajat voidaan jättää huomioimatta laskettaessa oikosulkuvirtoja. Lasketaan kuitenkin esimerkin vuoksi U muuntajan vaikutus oikosulkuvirtaan.

U muuntajan syöttämän ekvivalenttisen moottorin oikosulkuimpedanssi saadaan laskettua summatehojen avulla kaavan (21) mukaan käyttäen hyväksi taulukossa 5 esitettyjä mitattuja arvoja:

$$S = 1056 \text{ kVA}$$

$$P = 861 \text{ kW}$$

$$Q = 618 \text{ kvar ind}$$

$$\cos \varphi = 0,81$$

Pienjännitemoottoreille voidaan arvioida käynnistysvirraksi ABB:n moottoriluettelon /5/ perusteella 6,5. Moottorin hyötysuhteeksi voidaan arvioida 0,88. Kaavan (21) mukaan ekvivalenttisen moottorin impedanssiksi saadaan:

$$Z_M = \frac{1}{\frac{I_s}{I_n}} \cdot \frac{(U_n)^2 \cdot \eta \cdot \cos \varphi}{P_n} = \frac{1}{6,5} \cdot \frac{(500 \text{ V})^2 \cdot 0,88 \cdot 0,81}{861 \text{ kW}} = 0,031841 \Omega$$

Moottorin impedanssi tulee redusoida 5 kV:n tasoon, koska lasketaan oikosulkuvirtaa TAKO4-kiskostossa 5 kV:n puolella.

$$Z_{Mred} = Z_M \cdot \frac{1}{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2} = 0,031841 \Omega \cdot \frac{1}{\left(\frac{500 \text{ V}}{5000 \text{ V}}\right)^2} = 3,18413 \Omega$$

Impedanssi voidaan jakaa resistiiviseen ja reaktiiviseen komponenttiin kaavan (21) avulla seuraavasti:

$$X_M = 0,922 \cdot Z_M = 0,922 \cdot 3,18413 \, \Omega = 2,936 \, \Omega$$

$$R_M = 0,42 \cdot X_M = 0,42 \cdot 2,936 \, \Omega = 1,233 \, \Omega$$

Moottoriryhmän kokonaisimpedanssiksi 5kV jännitetasossa saadaan:

$$\underline{Z}_M = (1,233 + j2,936) \, \Omega = 3,184 \angle 67,22^\circ \, \Omega$$

U-muuntajan impedanssi lasketaan samoin kuin päämuuntajan oikosulkuimpedanssi.  
Oikosulkuimpedanssiksi saadaan:

$$\underline{Z}_{T(U)} = (0,09 + j0,77) \, \Omega = 0,775 \angle 83,33^\circ \, \Omega$$

U-muuntajan ja TAKO4:n kennon 15 välisen kaapelin impedanssi saadaan liitteestä 1.

$$\underline{Z}_{J(U)} = (0,0131 + j0,009) \, \Omega = 0,01594 \angle 34,59^\circ \, \Omega$$

Lähdön 15 kokonaisimpedanssiksi saadaan:

$$\underline{Z}_{15} = 0,01594 \angle 34,59^\circ \, \Omega + 0,775 \angle 83,33^\circ \, \Omega + 3,184 \angle 67,22^\circ \, \Omega = 3,948 \angle 70,22^\circ \, \Omega$$

TAKO4:n pääkiskostossa esiintyvä alkuoikosulkuvirta  $I_k''$  saadaan laskettua seuraavasti:

$$\begin{aligned} I_k'' &= I_{k(\text{syöttö})}'' + I_{k(15)}'' \\ &= \frac{1,1 \cdot 5000 \, \text{V}}{\sqrt{3} \cdot 0,2216 \angle 84,43^\circ \, \Omega} + \frac{1,1 \cdot 5000 \, \text{V}}{\sqrt{3} \cdot 3,948 \angle 70,22^\circ \, \Omega} = 14,7 \angle -83,65^\circ \, \text{kA} \end{aligned}$$

Jatkuvan tilan oikosulkuvirraksi saadaan:

$$I_k = I_{k(\text{syöttö})}'' = \frac{1,1 \cdot 5000 \, \text{V}}{\sqrt{3} \cdot 0,22843 \angle 84,42^\circ \, \Omega} = 13,9 \angle -84,42^\circ \, \text{kA}$$

Sysäysoikosulkuvirralle lasketaan ensimmäiseksi sysäyskertoimet kaavan (25) avulla.

$$\kappa_{\text{syöttö}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3(0,022193 / 0,22735)} = 1,75$$

$$\kappa_{15} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3(1,33615 / 3,71482)} = 1,353$$

Sysäysoikosulkuvirraksi saadaan kaavan (26) mukaan:

$$i_s = \kappa_{\text{syöttö}} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k(\text{syöttö})} + \kappa_{15} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k(15)}$$

$$= 1,75 \cdot \sqrt{2} \cdot 13,9 \text{ kA} + 1,353 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,8 \text{ kA} = 36,0 \text{ kA}$$

Ilman moottoriryhmää, jota siis ei tarvitse IEC 909 mukaan ottaa huomioon, sysäysoikosulkuvirta on:

$$i_{s(\text{ilman moottoreita})} = \kappa_{\text{syöttö}} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k(\text{syöttö})} = 1,75 \cdot \sqrt{2} \cdot 14,3 \text{ kA} = 34,4 \text{ kA}$$

Moottoriryhmän huomioiminen ei vaikuta merkittävästi oikosulkuvirtojen suuruuteen, joten IEC 909 mukainen tarkastelumalli on hyvin perusteltua. Moottoriryhmän käsittely aiheuttaa laskentaan huomattavasti lisätyötä ja tulokset muuttuivat alkuoikosulkuvirran osalta n. 0,7 kA ja sysäysoikosulkuvirran osalta n. 1,6 kA. Jatkuvan tilan oikosulkuvirtaan moottorikuormitus ei vaikuta mitenkään.



---

### **5.5 Oikosulkuvirrat Takon keskijänniteverkossa**

Tässä luvussa käsitellään Takon keskijänniteverkossa esiintyvät oikosulkuvirrat. Oikosulkuvirrat on laskettu edellisessä luvussa esitetyn esimerkin mukaisesti. Teoria oikosulkulaskennan komponenttien vaikutuksista on käsitelty luvussa 5.3 ja oikosulkuvirran luonne luvussa 5.2.

Pienjännitemoottoriryhmien osalta laskennan tarpeellisuus määritetään verkon normaalikytkennän, joka on kuvattu luvussa 3.1, kojeistokohtaisten oikosulkutehojen perusteella. Varayhteyksien tapauksissa käytetään oikosulkuvirtojen laskennassa pienjännitemoottoriryhmiä, mikäli se oli normaalikytkennän tapauksessa tarpeellista.

Oikosulkuvirtojen laskennassa oletetaan, että kaikki verkkoon kytketyt pyörivät koneet toimivat nimellistehollaan. Tämä siksi, että muuten laskennasta muodostuisi erittäin työlästä. Varayhteyksien käsittely rajoittuu tapauksiin, joissa on kaksi yhteyttä käytössä rinnakkain. Suurempien rinnankytkentämäärien esiintyminen edellyttäisi montaa yhtäaikaista vikaa, mikä on erittäin epätodennäköistä.

Oikosulkuvirtojen tunteminen verkon poikkeuskytkennöissä on tärkeää, jotta tiedetään ylittyykö katkaisijoiden nimellisvirrat näissä tilanteissa. Mikäli oikosulkuvirta ylittää laitteiden kestokyvyn, on kytkennät suoritettava siten, että laitteiden kanssa samassa tilassa ei ole kytkentähetkellä ihmisiä.

Laskemiseen käytetyt tiedot on esitetty liitteissä 1-5. Verkon normaalikytkentätilanteessa ilmenevät oikosulkuvirrat on esitetty liitteessä 6. Seuraavissa taulukossa on esitettyinä oikosulkuvirrat Takon eri kytkinlaitosten pääkiskostoissa eri verkon sisäisillä kytkennöillä.

Terminen oikosulkuvirta saadaan laskettua summaamalla yhteen eri oikosulkulähteiden syöttämät ekvivalenttiset yhden sekunnin oikosulkuvirrat. Terminen oikosulkuvirta lasketaan käyttäen hyväksi alkuoikosulkuvirtaa ja

kuormituksen luonteesta johtuvia kertoimia. Laskeminen on matemaattisesti niin helppoa, ettei siihen kiinnitetä tässä suurempaa huomiota.

Termisen oikosulkuvirran laskemista helpottaa myös se, että epätahtikoneiden aiheuttamaa oikosulkuvirtaa ei tarvitse ottaa huomioon, koska niiden tuottama oikosulkuvirta vaimenee nopeasti.

Oikosulkuvirtojen raja-arvoina käytetään kojeistojen suurimpia sallittuja oikosulkuvirtojen arvoja, jotka ovat dynaamisen oikosulkuvirran (sysäysoikosulkuvirran) osalta 100 kA ja termisen oikosulkuvirran osalta 40 kA.

Taulukko 8. Oikosulkuvirrat TAKO1:n pääkiskostossa

TAKO1 kytkentä	$I_k''$ [kA]	$I_k$ [kA]	$i_s$ [kA]	$I_{Is}$ [kA]
Normaali	30,64	13,72	72,73	20,71
Normaali + TAKO3	45,96	26,83	108,32	34,45
TAKO3	25,38	13,11	67,50	20,06

Taulukon 8 arvojen perusteella voidaan sanoa, että oikosulkuvirrat pysyvät riittävän pieninä, mikäli syöttöjä ei kytketä rinnakkain. Rinnankytkentä on poikkeuksellinen, ja se on realistinen vain hetken aikaa, kun muutetaan verkon kytkentää. Rinnakkaisilla syötoillä sysäysoikosulkuvirta ylittää kojeistojen dynaamisen oikosulkuvirtakestoisuuden, joka on 100 kA.

Taulukko 9. Oikosulkuvirrat TAKO2:n pääkiskostossa

TAKO2 kytkentä	$I_k''$ [kA]	$I_k$ [kA]	$i_s$ [kA]	$I_{Is}$ [kA]
Normaali	30,40	13,72	70,87	20,71
Normaali + TAKO3	46,54	27,64	109,40	35,30
TAKO3	15,87	13,92	45,88	14,60

Taulukon 9 arvoista voidaan sanoa oikosulkuvirtojen olevan hyväksyttäviä, lukuun ottamatta rinnankytkentätilannetta, jolloin sysäysoikosulkuvirta ylittää suurimman sallitun dynaamisen oikosulkuvirran arvon.

Taulukko 10. Oikosulkuvirrat TAKO3:n pääkiskostossa

TAKO3 kytkentä	$I_k''$ [kA]	$I_k$ [kA]	$i_s$ [kA]	$I_{Is}$ [kA]
Normaali	16,41	14,18	39,50	14,87
Normaali + TAKO4 TAKO1 kautta	45,03	26,95	104,41	34,58
Normaali + TAKO4 TAKO2 kautta	46,20	27,54	108,07	35,19
TAKO4 TAKO1 kautta	30,87	12,78	70,11	19,72
TAKO4 TAKO2 kautta	32,20	13,53	74,42	20,51

TAKO3-kojeiston osalta voidaan sanoa oikosulkuvirtojen olevan hyväksyttävissä rajoissa lukuun ottamatta syöttöjen rinnankytkentää. Rinnankytkennässä sysäysoikosulkuvirran aiheuttamat voimavaikutukset kasvavat liian suuriksi verrattuna kojeiston valmistajan antamiin suurimpiin sallittuihin arvoihin.

Taulukko 11. Oikosulkuvirrat TAKO4:n pääkiskostossa

TAKO4 kytkentä	$I_k''$ [kA]	$I_k$ [kA]	$i_s$ [kA]	$I_{Is}$ [kA]
Normaali	30,70	13,90	71,96	20,90
Normaali + T2	34,90	13,90	82,39	23,94
Normaali + Alakoski	45,53	24,84	108,13	35,28
Alakoski	31,65	10,94	73,72	20,70
Normaali + TAKO3 TAKO1 kautta	46,01	26,52	106,59	34,13
TAKO 3 TAKO1 kautta	32,14	13,11	73,18	20,06

TAKO4-kojeiston pääkiskoston oikosulkuvirrat pysyvät sallituissa rajoissa normaalikytkennässä ja muissakin, mikäli syöttöjen rinnankytkentöjä ei oteta huomioon. Rinnankytkennöissä sysäysoikosulkuvirta kasvaa liian suureksi. Kytkentöjen muutokset voidaan suorittaa rinnankytkentöjen kautta, mikäli samassa tilassa ei ole kytkentä hetkellä ihmisiä.

Termiset oikosulkuvirrat eivät ylitä kojeistojen kestoa (40kA) millään lasketuista tapauksista. Oikosulkuvirran yhden sekunnin ekvivalenttinen arvo ylittää sallitun 40 kA rajan vasta kolmen syötön rinnankytkennällä. Raja ylitetään myös TKS verkon kahden 110kV/20kV muuntajan rinnankytkennässä, mikäli Takolla on samaan aikaan

syöttöjen rinnankytkentöjä.. Edellä mainittu tilanne ei kuitenkaan ole normaali, vaan on käytössä vain TKS:n verkon kytkentöjä muutettaessa.

Laskennassa ei ole otettu huomioon generaattoreiden kaapeleiden impedanssia, joten tulokset ovat hieman yläkanttiin. Tästä ei ole haittaa, koska tulosten tulee pysyä rajan alapuolella. Lisäksi lasketut termiset oikosulkuvirrat ovat yhden sekunnin ekvivalenttisia arvoja. Oikosulkuvirran lämpövaikutus on todellisen, lyhyemmän kestoajan vuoksi pienempi kuin tässä laskettu. Näin toimien otetaan hieman marginaalia turvalliseen suuntaan.

Oikosulkuvirtojen suuruudesta voidaan yleisesti sanoa, että oikosulkujen voimavaikutukset kasvavat kahden päämuuntajan rinnankytkennässä liian suuriksi. Tämä on kuitenkin sallittava poikkeus, mikäli kytkennät tehdään tilanteessa, jolloin kytkinlaitoksissa ei ole ihmisiä sisällä.

## 6 SILMÄMÄÄRÄINEN TARKASTUS

Silmämääräinen tarkistus suoritettiin Maaliskuussa 2007 tarkastamalla kaikki keskijänniteverkon komponentit lukuun ottamatta kaapelointeja. Kaapelointien tarkastus olisi ollut erittäin työläs operaatio, eikä työn määrä olisi vastannut saavutettua hyötyä. Tarkastusten pääpaino oli öljymuuntajien kunnon arvioinnissa. Tarkastuksen pohjalta M-real Tako voi suunnitella muuntajien huollon ajoitusta.

Tarkastuksessa kiinnitettiin huomiota muuntajatilojen puhtauteen, kylttien ja tunnusten olemassaoloon, öljyvuotoihin, ilmankuivaimien kuntoon ja kaikkiin muihin seikkoihin mitä silmämääräisesti voi päätellä.

Takolla olevista muuntajista noin puolet on uudempia kuivamuuntajia, jotka ovat koteloitu siten, ettei niiden tarkastamien perusteellisesti ole käytön aikana mahdollista. Kuivamuuntajien rakenteesta johtuen niissä ei esiinny niin paljoa silmämääräisesti havaittavia puutteita kuin öljymuuntajissa, joten perusteellisempi tarkastus on tärkeämpää juuri öljymuuntajille.

### **6.1 Tarkastuksen tulokset**

Silmämääräisessä tarkastuksessa havaitut viat ja puutteet on esitetty kootusti liitteessä 8. Tarkastuksessa ei havaittu mitään akuuttia korjaustarvetta vaativaa kohdetta. Tarkastuksessa kuitenkin havaittiin huoltoa tarvitsevia kohteita. Huollot tulee suorittaa muuntajien ollessa jännitteettöminä, joten todennäköinen suoritusajankohta on juhannusseisokki.

Seuraavassa luvussa on esitetty joitakin silmämääräisessä tarkastuksessa havaittuja puutteita. Havaituista puutteista on esitetty valokuva havainnollistamaan tilannetta. Kaikista havaituista vioista ei esitetä kuvaa, koska tällöin luvun pituus paisuisi tarpeettoman suureksi. Puutteista esitetään yksi esimerkkitapaus jokaista havaittua vikatyypistä kohden. Tämä käsittely on riittävää, koska M-real Takolle toimitetaan joka tapauksessa kaikki otetut valokuvat ja liitteenä oleva koottu raportti havaituista vioista.

### **6.2 Esimerkkejä tarkastuksessa havaituista puutteista**

Ilmankuivaimien osalta tarkastuksessa havaittiin joissakin muuntajissa huollon tarvetta. Kuivaimissa oli osassa muuntajia käytetty vanhaa kuivaussuolaa, joka on karsinogeenista. Kuivaimien suolan vaihto ei kuitenkaan ole tarpeellista ennen kuin suola on vanhentunut ja sitonut itseensä kosteutta. Seuraavassa kuvassa on esitetty huonoin havaittu kuivain.



Kuva 7. Huonoin ilmankuivain

Kuva 7 esittää K-muuntajan ilmankuivainta. Kuivaimen suolan pitäisi olla joko sinistä (vanhempi kuivaussuola) tai oranssia (uudempi kuivaussuola). Molemmat tummenevat sidottuaan riittävästi kosteutta. Kuvan kuivain on sitonut itseensä jo maksimimäärän kosteutta, eikä näin ollen enää toimi toivotulla tavalla. Kuivaimen huolto olisi suoritettava mahdollisimman pian.

Muut havaitut ongelmat kuivaimissa eivät olleet yhtä ilmeisiä ja pahoja kuin kuvan 7 tapaus. Osassa muuntajia kuivaimen öljy oli kohtalaisen likaista, joten kuivaimen öljynvaihto olisi ajankohtaista. Kokonaisuutena kuivaimet olivat kohtuullisen hyvässä kunnossa.

Muuntajien öljyvuotojen osalta tarkastuksessa havaittiin osassa muuntajia selviä vuodon merkkejä. Vuodot eivät olleet laajoja, vaan paikallisia ja pienehköjä. Muuntajien alla oli asianmukaiset valuma-altaat, joten öljyvuodot eivät aiheuta ympäristölle ongelmia. Vuotoihin kannattaa silti kiinnittää huomiota, sillä öljy toimii osaltaan muuntajan eristeenä ja jäähdytysaineena.



Kuva 8. O-muuntajan öljyvuoto

O-muuntajan öljyvuoto on seurausta muuntajan tyhjennyspropun tiivistyksen pettämisestä. Tiivisteen vaihtaminen on hankalaa, koska vaihdon aikana öljyt valuisivat ulos muuntajasta. Vuotoa saataisiin todennäköisesti pienennettyä kiristämällä tyhjennyspropun ruuvia.

Tarkastuksessa havaitut öljyvuodot olivat pääasiassa seurausta tyhjennysproppujen tiivistyksen pettämisestä. Joissakin muuntajissa vuoto oli havaittavissa niin ylhäällä, että vuodon lähde oli jokin muu, esimerkiksi kaasurele tai muuntajan kannen tiivisteet. Kokonaisuutena muuntajissa ei ollut kovinkaan suuria öljyvuotoja havaittavissa.

Muuntajatilojen puhtaudessa ei ollut juurikaan huomauttamista. Ulkotiloissa olevat muuntajat altistuvat väkisinkin pölylle ja muille ulkoilman epäpuhtauksille, joten muuntajatilojen ei voi olettaa olevan steriilejä. Varsinkin G- ja F-muuntajat ja niiden tilat olivat lintujen ulosteiden likaamia. Lintuverkoille tulisi tehdä jotain korjausta ja muuntajia pitäisi hieman siistiä. seuraavassa on esitettyä kuva G-muuntajasta.



Kuva 9. G-muuntajan kansi

Muuntajien kannella ja varsinkin syöttöpuolen eristimissä oleva linnunuloste saattaa heikentää muuntajan eristeiden ylilyöntilujuutta, joten niiden puhdistaminen on perusteltua. Linnunulosteiden lisäksi muuntajatiloihin ei juuri ollut likaa tai tiloihin kuulumattomia esineitä. Kokonaisuutena muuntajatilat olivat suhteellisen siistejä, eikä niiden siivoaminen, linnunulosteita ja joidenkin muuntajien pölyisyyttä lukuun ottamatta, ole kovinkaan mielekästä.

Muuntajatilojen ovien mekaaninen toiminta oli kahdessa muuntajatilassa puutteellista. P-muuntajan toinen ovi aukesi vaillinaisesti ja VA- ja VB-muuntajien tilan toinen ovi ei auennut lainkaan. Ovet tulisi korjata siten, että muuntajien luokse on esteetön pääsy huoltotoimenpiteisiin. VA- ja VB-muuntajien huoltaminen on nykytilanteessa hieman hankalaa.



---

## 7 TULOSTEN TARKASTELU

Tehtaan loistehotasapainon osalta tulosten tarkkuus on kohtuullisen hyvä, koska tehtaan kuormitus oli mittaushetkellä lähellä suurinta esiintyvää kuormitusta. Kaikki kolme kompensointiparistoa toimivat hyvin lähellä nimellistehoaan, joten nykyisellä laitteistolla ei ole mahdollista tuottaa enempää loistehoa. Generaattori T5:llä on mahdollista tuottaa lisää loistehoa, mutta generaattorin tuottaman pätötehon määrää on silloin pienennettävä. Kompensoinnin tilanne on muuttunut viimevuosina huomattavasti, kun hiomotoiminta tehtaalla on lopetettu. Hiomon suuret tahtikoneet hoitivat myös kompensointilaitteiston tehtäviä.

Oikosulkuvirtojen osalta Takon keskijänniteverkko on hyvin hoidettu. Oikosulkuvirrat pysyvät kaikissa tilanteissa kojeistojen mitoitusarvojen alapuolella, lukuun ottamatta erittäin harvinaisia kytkentätilanteita. Oikosulkuvirtojen kannalta suurin ongelma teollisuusverkoissa on vikavirtojen kasvaminen liian suureksi. Takolla vikavirrat pysyvät kurissa syöttävän verkon verrattain pienen oikosulkutehon ja suurjännitemoottoreiden pienen määrän avulla.

Takon keskijänniteverkon komponenttien mekaaninen kunto oli kokonaisuudessaan hyvä. Katkaisijalaitteet ovat uusia vaunukatkaisijoita, pääasiassa SF6-eristeisiä, ja muuntajistakin suuri osa on kuivamuuntajia. Öljymuuntajien osalta tarkastuksessa huomattiin huoltotarpeita, jotka tulisi hoitaa, jotta muuntajien käyttöikä ei alenisi. Tarkastuksessa havaittiin myös joitakin turvallisuuteen liittyviä puutteita, jotka eivät kuitenkaan olleet vakavia.

## 8 LÄHTEET

- /1/ <http://inter2.tampere.fi/tehdas/akseli/tuotteet/paperi.htm>, 7.3.2007
- /2/ <http://www.metsaliitto.fi/default.asp?path=1;39;186>, 7.3.2007
- /3/ ABB oy, Teknisiä tietoja ja taulukoita, TTT. Vaasa 2000. 626 s.
- /4/ International electrotechnical comission, IEC 909. 1988. 175 s.
- /5/ Drive IT pienjännitteiset vakiomoottorit-luettelo, ABB oy
- /6/ Kari Huotari – Jarmo Partanen, Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. Lappeenrannan teknillinen yliopisto 1998. 46 s.
- /7/ Suomen standardoimisliitto, SFS 6001 Suurjännitesähköasennukset. Helsinki 2001. 118 s.

## 9 LIITTEET

Liite 1 Muuntajaluettelo kilpitiedoilla

Liite 2 Moottoriryhmien laskenta

Liite 3 kaapeliluettelo pituuksilla ja impedansseilla

Liite 4 Generaattoreiden ja moottoreiden impedanssit ja oikosulkuvirrat

Liite 5 Generaattoreiden ja suurjännitemoottoreiden kilpítiedot

Liite 6 Pääkaavio oikosulkuvirtojen kanssa normaalissa verkon sisäisessä kytkennässä

Liite 7 M-real oyj Takon keskijänniteverkon pääkaavio

Liite 8 Silmä määräisen tarkastuksen tarkastusraportti

Liite 1 Muuntajaluettelo kilpitiedoilla

Muuntajien impedanssit

Tunnus	S/kVA	U1/V		U2/V	I1/A	I2/A	Uk/%	Ur/%	Po/W	Pk/W	Zk/ Ω	Rk/ Ω	Xk/ Ω	kulma
PM1	15000	22000	±7x2%	5300	1as. 345 8as. 394 15as. 458	1634	7,20	0,40	12000	60000	2,32	0,13	2,32	86,82
PM2	10000	22000	±7x2%	5300	1as. 230 8as. 262 15as. 305	1090	6,90	1as. 0,64 8as. 0,65 15as. 0,85	10000	65000	3,34	0,31	3,32	84,59
PM3	20000 ONAF 16000 ONAN	22000	+6x2% -7x2%	5300			9,00	0,70 0,56	8900	139000 89000	2,42	0,17	2,41	85,99
A	2000	5000	±5%	525/303	231	2200	6,22	1,20	3000	24000	0,78	0,15	0,76	78,88
B	2000	5100	±2x2,5%	525/303	231	2200	6,00	0,70	2700	14200	0,78	0,09	0,77	83,30
C	1600	5100	±5%	525/303	181	1760	5,83	1,00	4200	16000	0,95	0,16	0,93	80,12
D	2000	5100	±2x2,5%	525/303	226,5	2200	5,70	0,84	2460	16800	0,74	0,11	0,73	81,53
E	2000	5100	±2x2,5%	525/303	231	2200	6,00	0,70	2700	14200	0,78	0,09	0,77	83,30
F	1600	5100	±5%	525/303	181	1760	5,87	1,00	4200	16000	0,95	0,16	0,94	80,19
G	2000	5100	±2x2,5%	525/303	231	2200	6,00	0,70	2700	14200	0,78	0,09	0,77	83,30
H	2000	5100	±2x2,5%	525/303	226,5	2200	5,50	0,83	2300	16600	0,72	0,11	0,71	81,32
I	2000	5100	±2x2,5%	525/303	226	2199	5,82	0,60	3600	12000	0,76	0,08	0,75	84,08
J	2500	5100	±2x2,5%	525/303	283	2749	6,00	0,56	4300	16100	0,62	0,06	0,62	84,64
K	1600	5100	±5%	525/303	181	1760	6,00	1,00	4200	16000	0,98	0,16	0,96	80,41
L	2000	5100	±2x2,5%	525/303	226	2199	5,82	0,60	3600	12000	0,76	0,08	0,75	84,08
M	2000	5100	±2x2,5%	525/303	226	2199	6,00	0,60	3600	12000	0,78	0,08	0,78	84,26
N	2000	5100	±2x2,5%	525/303	226	2199	6,00	0,60	3600	12000	0,78	0,08	0,78	84,26
O	1600	5100	±5%	525/303	181	1760	5,88	1,00	4200	16000	0,96	0,16	0,94	80,21
P	1600	5100	±5%	525/303	181	1760	5,92	1,00	4200	16000	0,96	0,16	0,95	80,28
Q	2000	5100	±2x2,5%	525/303	226	2199	5,82	0,60	3600	13800	0,76	0,08	0,75	84,08
R	2000	5100	±2x2,5%	525/303	226,4	2199	6,00	0,71	2700	14200	0,78	0,09	0,77	83,20
S	2000	5100	±2x2,5%	525/303	226,5	2200	6,00	0,84	2500	16800	0,78	0,11	0,77	81,95
T	2000	5100	±2x2,5%	525/303	226,5	2200	6,00	0,85	2750	17000	0,78	0,11	0,77	81,86
U	2000	5100	±2x2,5%	525/303	226,4	2200	6,00	0,73	3000	14500	0,78	0,09	0,77	83,01
VA	1000	5100	±5%	400/231	113	1444	7,85	1,40	2000	14000	2,04	0,36	2,01	79,73
VB	1000	5100	±2x2,5%	400/231	113,2	1444	7,80	1,18	1250	11800	2,03	0,31	2,01	81,30
W	2000	5100	±2x2,5%	525/303	226	2199	5,82	0,60	3600	12000	0,76	0,08	0,75	84,08
X	2000	5100	±2x2,5%	525/303	226	2199	5,82	0,60	3600	12000	0,76	0,08	0,75	84,08
Y	2000	5100	±2x2,5%	525/303	226,4	2199	6,10	0,72	3364	14335	0,79	0,09	0,79	83,22
Z	2000	5100	±2x2,5%	525/303	226	2199	5,82	0,60	3600	12000	0,76	0,08	0,75	84,08
KK1	2500	5100	±2x2,5%	525/303	283	2749	6,00	0,56	4300	16100	0,62	0,06	0,62	84,64
KK3	1250	5250	±2x2,5%	400/231	137,5	1804	6,00	0,86	1820	10800	1,32	0,19	1,31	81,76
huolto	800	5250	±2x2,5%	400/231	87,98	1155	6,00	0,89	1477	7112	2,07	0,31	2,04	81,47
OK	300	5000	±5%	400/231	34,7	433	5,00	1,00	600	3000	4,17	0,83	4,08	78,46

Liite 2 Moottoriryhmien laskelmat

muuntaja	$S_n$ / kVA	$P_{tot}$ / kW	$S_k''$ / MVA		$\Sigma P_{nM} / \Sigma S_{nT}$	$\frac{0,8}{\left  \frac{c \cdot 100 \cdot \sum S_{nT}}{S_k''} - 0,3 \right }$	Ehto 1=tosi
A ja K	3600	1506	119		0,418333333	0,264224258	0
B ja H	4000	792	120		0,198	0,237623762	1
C	1600	231	119		0,144375	0,678545973	1
D	2000	756	123		0,378	0,537411251	1
E ja R	4000	1998	119		0,4995	0,235468711	0
F	1600	603	119		0,376875	0,678545973	1
G	2000	1038	123		0,519	0,537411251	1
I	2000	729	123		0,3645	0,537411251	1
J	2500	462	123		0,1848	0,413271735	1
L	2000	1317	119		0,6585	0,516549105	0
M	2000	852	119		0,426	0,516549105	1
N	2000	252	123		0,126	0,537411251	1
O	1600	429	119		0,268125	0,678545973	1
P	1600	276	119		0,1725	0,678545973	1
Q	2000	591	123		0,2955	0,537411251	1
S	2000	1413	119		0,7065	0,516549105	0
U	2000	861	120		0,4305	0,52173913	1
W	2000	660	123		0,33	0,537411251	1
X	2000	615	123		0,3075	0,537411251	1
Y	2000	1293	119		0,6465	0,516549105	0
Z	2000	465	123		0,2325	0,537411251	1
KK3	1250	322	119		0,2576	0,935166994	1
KK1	2500	900	123		0,36	0,413271735	1

$$\text{Ehto: } \frac{\sum P_{nM}}{\sum S_{nT}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{c \cdot 100 \cdot \sum S_{nT}}{S_k''} - 0,3 \right|}$$

## Liite 3 Kaapeliluettelo pituuksilla ja impedansseilla

TAKON 20 kV VOIMAKAAPELIT								
Yhteys	Kaapelin tyyppi	lukum.	poikkipinta	l / m	R / mΩ	X / mΩ	Z / mΩ	l <sub>tot</sub> / m
Linja 1 Ratina - PM1	APYAKMM	2	3x185	800	69,6	42,4	81,5 / 31,35	1600
Linja 2 Ratina - PM2	PYLKVJ	1	3x120	800	128	96	160,0 / 36,87	800
	APYAKMM	1	3x185	800	139,2	84,8	163,0 / 31,35	800
Linja 3 Ratina - PM3	AHXCМК-W	2	3x185	800	65,6	42,4	78,1 / 32,88	1600
TAKON 5 kV VOIMAKAAPELIT								
Yhteys	Kaapelin tyyppi	lukum.	poikkipinta	l / m	R / mΩ	X / mΩ	Z / mΩ	l <sub>tot</sub> / m
PM2 - ALAKOSKI	AHMCМК	7	3x120	50	1,8	0,9	2 / 25,26	350
ALAKOSKI 8 - G1	AHMCМК	3	1x300	40	1,6	2,09	2,64 / 52,62	120
ALAKOSKI 10 - G2	AHMCМК	3	1x300	40	1,6	2,09	2,64 / 52,62	120
TAKO 4 3 - ALAKOSKI 15	AHXCМК-WCT	2	3x300	55	2,8	2,9	3,96 / 46,03	110
TAKO 4 10 - TAKO 1 8	AHXCМК-WCT	4	3x300	70	1,8	1,8	2,52 / 46,03	280
TAKO 4 11 TAKO 2 1	AHXCМК-WCT	3	3x300	55	1,8	1,9	2,64 / 46,03	165
PM1 - TAKO 4 12	AHXCМК-WCT	6	3x300	90	1,5	1,56	2,16 / 46,03	540
TAKO 4 13 - B muuntaja	AHXCМК-WCT	1	3x185	80	13,1	9	15,94 / 34,59	80
TAKO 4 13 - H muuntaja	AHXCМК-WCT	1	3x185	80	13,1	9	15,94 / 34,59	80
TAKO 4 14 - VA muuntaja	AHXCМК-WCT	1	3x185	80	13,1	9	15,94 / 34,59	80
TAKO 4 15 - U muuntaja	AHXCМК-WCT	1	3x185	80	13,1	9	15,94 / 34,59	80
TAKO 1 0 - T5 generaattori	AHXCМК	1	2x3x1x800	30	1	1,7	2,00 / 60,66	30
TAKO1 1 - O muuntaja	AHXCМК-WCT	1	3x185	60	9,80	6,8	11,95 / 34,59	60
TAKO1 2 - P muuntaja	AHXCМК-WCT	1	3x185	103	16,9	11,6	20,52 / 34,59	103
TAKO1 3 - huolto muuntaja	AHXAMK-W	1	3x185	50	8,2	5,5	9,87 / 33,84	50
TAKO1 4 - S muuntaja	AHXCМК-WCT	1	3x185	160	26,2	18,1	31,88 / 34,59	160
TAKO1 5 - T muuntaja	AHXCМК-WCT	1	3x185	160	26,2	18,1	31,88 / 34,59	160
TAKO1 6 - kompensointi	AHXCМК-WCT	4	3x185	18	0,7	0,5	0,89 / 33,84	72
TAKO1 9 - T2 generaattori	PLKV	2	3x120 +	40	3,16	1,88	3,68 / 30,75	80
	PLKV	2	3x120	40	3,16	1,88	3,68 / 30,75	80
TAKO1 12 - F muuntaja	HMCМК	1	3x150	115	14,5	8,5	16,80 / 30,43	115
TAKO1 13 - E muuntaja	APAKM	1	3x185	110	18,7	8	20,32 / 23,03	110
TAKO1 13 - R muuntaja	AHXAMK-W	1	3x185	145	23,8	16,4	28,63 / 33,84	145
TAKO1 14 - KK3 muuntaja	AHXCМКM	1	3x185	125	21,1	13,4	24,99 / 32,29	125
TAKO1 15 - Y muuntaja	AHXAMK-W	1	3x185	100	16,9	11	19,75 / 33,84	100
TAKO1 16 - C muuntaja	APAKM	1	3x185	55	9,4	4	10,16 / 23,03	55
TAKO1 17 - A muuntaja	AHXAMK	1	3x185	40	6,8	4,3	8,00 / 32,33	40
TAKO1 17 - K muuntaja	AHXAMK-W	1	3x185	50	8,5	5,5	10,08 / 33,84	50
TAKO1 18 - TAKO 3 3	AHXAMK-W	1	3x1x800	130	9,66	17,03	19,58 / 60,44	130
TAKO 2 3 - TAKO 3 2	AHXCМК	1	3x1x800	30	2,2	3,9	4,52 / 60,44	30
TAKO 2 4 - CTMP jauhin	AXKJ-SM	1	3x185	52	8,53	4,57	9,68 / 28,21	52
TAKO 2 5 - KOIVU jauhin	AHXAMK-W	1	3x185	70	11,8	7,7	14,11 / 33,84	70
TAKO 2 6 - kompensointi	AMCМК	4	3x185	5	0,2	0,1	0,23 / 25,59	20
TAKO 2 7 - M muuntaja	AHXAMK-W	1	3x185	20	3,3	2,2	3,95 / 33,84	20
TAKO 2 8 - L muuntaja	AHXAMK-W	1	3x185	20	3,3	2,2	3,95 / 33,84	20
TAKO 2 9 - MÄNTY1 jauhin	AHXAMK-W	1	3x185	60	9,8	6,6	11,85 / 33,84	60
TAKO 2 10 - MÄNTY2 jauhin	AHXAMK-W	1	3x185	60	9,8	6,6	11,85 / 33,84	60
PM3 - TAKO 3 1	AHXCМК	1	3x3x1x800	140	3,02	5,32	6,12 / 60,39	140
TAKO 3 5 - VC muuntaja								0
TAKO 3 6 - N muuntaja	AHXAMK-W	1	3x185	25	4,1	2,7	4,94 / 33,84	25
TAKO 3 7 - Q muuntaja	AHXAMK-W	1	3x185	25	4,1	2,7	4,94 / 33,84	25
TAKO 3 8 - X muuntaja	AHXAMK-W	1	3x185	25	4,1	2,7	4,94 / 33,84	25
TAKO 3 9 - Z muuntaja	AHXAMK-W	1	3x185	25	4,1	2,7	4,94 / 33,84	25
TAKO 3 10 - G muuntaja	AHXAMK-W	1	3x185	85	13,9	9,3	16,78 / 33,84	85
TAKO 3 11 - kompensointi	AHXAMK-W	4	3x185	35	1,5	1	1,73 / 33,84	140
TAKO 3 12 - D muuntaja	AHXAMK-W	1	3x185	75	12,3	8,2	14,91 / 33,84	75
TAKO 3 13 - J muuntaja	AHXAMK-W	1	3x185	110	18	12,1	21,72 / 33,84	110
TAKO 3 14 - HIOKE jauhin	AHXAMK-W	1	3x185	90	14,8	9,9	17,77 / 33,84	90
TAKO 3 15 - TVKH jauhin	AHXAMK-W	1	3x185	90	14,8	9,9	17,77 / 33,84	90
TAKO 3 16 - CTMP3 jauhin	AHXAMK-W	1	3x185	90	14,8	9,9	17,77 / 33,85	90
TAKO 3 17 - KK1 muuntaja	AHXAMK-W	1	3x185	120	19,7	13,2	23,69 / 33,84	120
TAKO 3 18 - W muuntaja	AHXAMK-W	1	3x185	100	16,4	11	19,75 / 33,84	100
TAKO 3 19 - I muuntaja	AHXAMK-W	1	3x185	105	17,2	11,5	20,73 / 33,84	105
TAKO 3 20 - VB muuntaja	AHXCМК-WCT	1	3x185	114	18,7	12,5	22,51 / 33,84	114

# Liite 4 Generaattoreiden ja moottoreiden impedanssit ja oikosulkuvirrat

## Generaattorit

tunnus	$Z_{\text{kaapeli}}$	$Z_{\text{generaattori}}$	$Z_{\text{tot}}$	$I_k$	$I_k''$	$\kappa$	$i_s$
T5	$0,001 + j \ 0,0017$	$0,0259 + j \ 0,3699$	$0,0269 + j \ 0,3716$	8,52	$0,6154 - j \ 8,5001$	1,81	21,80
T2	$0,0016 + j \ 0,001$	$0,0515 + j \ 0,7362$	$0,0531 + j \ 0,7372$	4,30	$0,3087 - j \ 4,2852$	1,81	10,99

## Suurjännitemoottorit

tunnus	$Z_{\text{kaapeli}}$	$Z_{\text{moottori}}$	$Z_{\text{tot}}$	$I_k$	$I_k''$	$\kappa$	$i_s$
CTMP	$0,0085 + j \ 0,0046$	$0,6250 + j \ 4,1670$	$0,6335 + j \ 4,1716$	0,75	$0,1123 - j \ 0,7440$	1,64	1,75
KOIVU	$0,0118 + j \ 0,0077$	$0,8189 + j \ 5,4591$	$0,8307 + j \ 5,4668$	0,57	$0,0863 - j \ 0,5675$	1,64	1,33
MÄNTY1	$0,0098 + j \ 0,0066$	$1,0055 + j \ 6,7030$	$1,0153 + j \ 6,7096$	0,47	$0,0700 - j \ 0,4627$	1,64	1,09
MÄNTY2	$0,0098 + j \ 0,0066$	$1,0055 + j \ 6,7030$	$1,0153 + j \ 6,7096$	0,47	$0,0700 - j \ 0,4627$	1,64	1,09
HIOKE	$0,0148 + j \ 0,0099$	$0,6250 + j \ 4,1670$	$0,6398 + j \ 4,1769$	0,75	$0,1138 - j \ 0,7428$	1,64	1,74
TVKH	$0,0148 + j \ 0,0099$	$0,8005 + j \ 5,3364$	$0,8153 + j \ 5,3463$	0,59	$0,0885 - j \ 0,5805$	1,64	1,36
CMP3	$0,0148 + j \ 0,0099$	$0,5233 + j \ 3,4886$	$0,5381 + j \ 3,4985$	0,90	$0,1364 - j \ 0,8867$	1,64	2,08

## Pienjännitemoottoriryhmät

Muuntaja	$Z_{\text{muuntaja+kaapeli}}$	$Z_{\text{moottoriryhmä}}$	$Z_{\text{tot}}$	$I_k$	$I_k''$	$\kappa$	$i_s$
A ja K	$0,0822 + j \ 0,4279$	$0,7304 + j \ 1,739$	$0,8126 + j \ 2,1669$	1,37	$0,4818 - j \ 1,2848$	1,34	2,60
E ja R	$0,0565 + j \ 0,3935$	$0,5576 + j \ 1,3276$	$0,6140 + j \ 1,7211$	1,74	$0,5839 - j \ 1,6367$	1,36	3,33
L	$0,0813 + j \ 0,7551$	$0,8673 + j \ 2,065$	$0,9486 + j \ 2,8201$	1,07	$0,3403 - j \ 1,0116$	1,38	2,08
S	$0,1185 + j \ 0,7929$	$0,8283 + j \ 1,9722$	$0,9469 + j \ 2,7651$	1,09	$0,3520 - j \ 1,0279$	1,37	2,11
Y	$0,1105 + j \ 0,7988$	$0,8834 + j \ 2,1033$	$0,9939 + j \ 2,9021$	1,04	$0,3354 - j \ 0,9793$	1,37	2,01

## Alakosken generaattorit

tunnus	$Z_{\text{kaapeli}}$	$Z_{\text{generaattori}}$	$Z_{\text{tot}}$	$I_k$	$I_k''$	$\kappa$	$i_s$
G1	$0,0016 + j \ 0,00209$	$0,1128 + j \ 1,6113$	$0,1144 + j \ 1,6134$	1,96	$0,1389 - j \ 1,95831$	1,81	5,03
G2	$0,0016 + j \ 0,00209$	$0,1128 + j \ 1,6113$	$0,1144 + j \ 1,6134$	1,96	$0,1389 - j \ 1,95831$	1,81	5,03

Moottoriryhmien laskennassa seuraavat oletukset:  
(vastaavat tyypillistä prosessiteollisuuden moottoria)

$$T_S / T_N = 6,5$$

$$\eta = 0,88$$

$$Z_M = \frac{1}{I_s} \cdot \frac{(U_n)^2 \cdot \eta \cdot \cos \varphi}{P_n}$$

$$R_M = 0,42 \cdot X_M \text{ ja } X_M = 0,922 \cdot Z_M$$

Moottorin teho on mitattu lähdön kokonaispätöteho

Liite 5 Generaattoreiden ja suurjännitemoottoreiden kilpitiedot

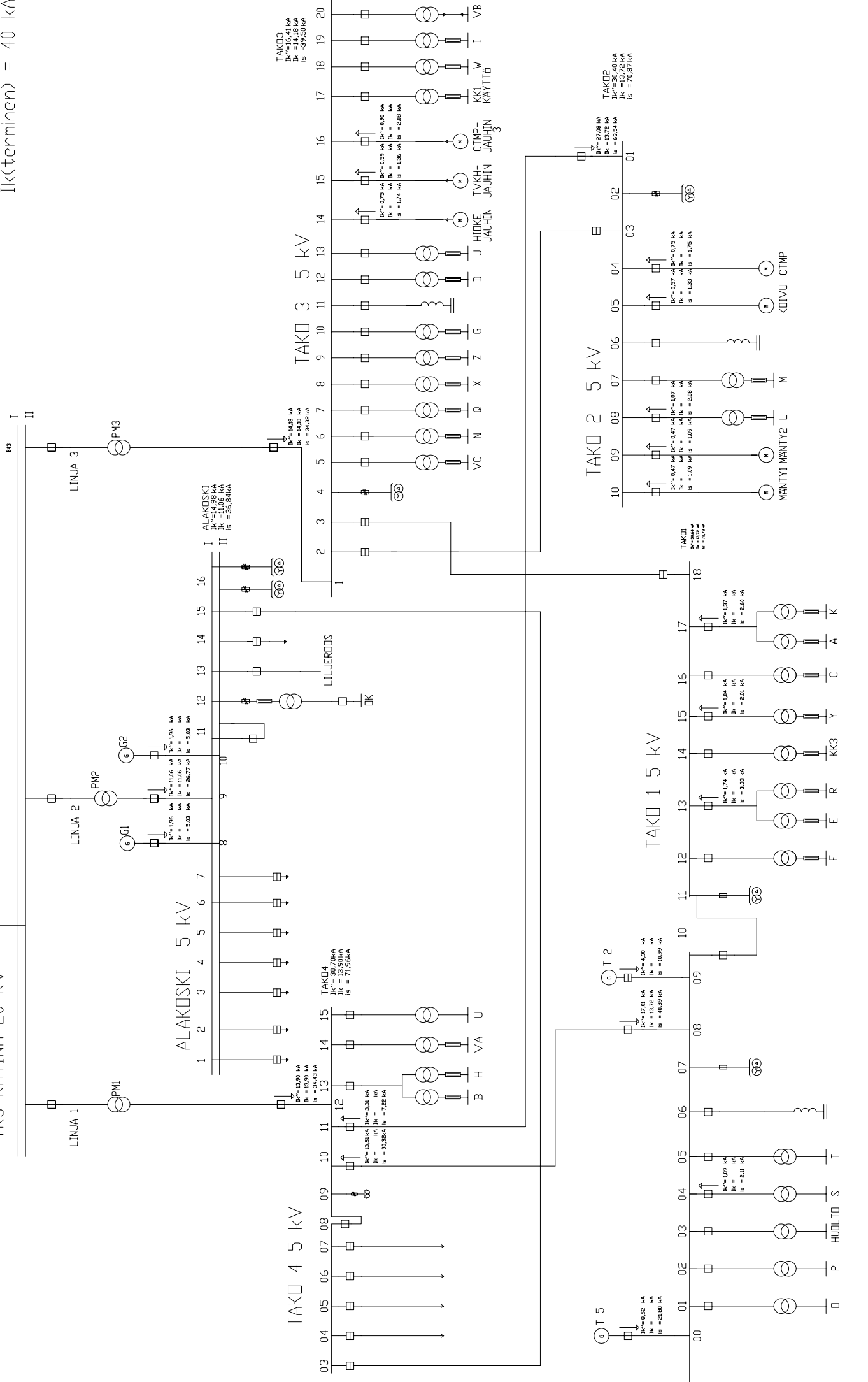
Generaattorit (tahtikoneita)																			
tunnus	S / kVA	U / V	I / A	sin φ	cos φ	X"d / %	X'd / %	Xd / %	n / rpm	η	Is / In	Zk / Ω	kulma	Xm / Ω	Rm / Ω	K <sub>G</sub>	Z <sub>k</sub> '	Xm'	Rm'
T5	14000	5250	1540	0,6	0,8	20,1	26,8	258,6	1500										
T2	6250	5150	700	0,6	0,8	18	25	192											
G1(alakoski)	3200	5250	353	0,6	0,8	20	30	100	88										
G2(alakoski)	3200	5250	353	0,6	0,8	20	30	100											
												0,3967	85,9958	0,3957	0,0277	0,9349	0,3709	0,3699	0,0259
												0,7657	85,9958	0,7638	0,0535	0,9639	0,7380	0,7362	0,0515
												1,7269	85,9958	1,7227	0,1206	0,9354	1,6153	1,6113	0,1128
												1,7269	85,9958	1,7227	0,1206	0,9354	1,6153	1,6113	0,1128
Jauhimet (epätahtikoneita)																			
P / kW																			
arvioitu																			
CTMP	800	5000	111		0,86				1491	0,972	6,2	4,2133	81,4692	4,1670	0,6250				
KOIVU	630	5000	85		0,89				1491	0,969	6,2	5,5198	81,4692	5,4591	0,8189				
MÄNTY1	500	5000	69		0,87				1491	0,966	6,2	6,7776	81,4692	6,7030	1,0055				
MÄNTY2	500	5000	69		0,87				1491	0,966	6,2	6,7776	81,4692	6,7030	1,0055				
HIOKE	800	5000	111		0,86				1491	0,972	6,2	4,2133	81,4692	4,1670	0,6250				
TVKH	630	5000	86		0,87				1491	0,969	6,2	5,3957	81,4692	5,3364	0,8005				
CMTP3	1000	5000	134		0,9				1491	0,972	6,2	3,5274	81,4692	3,4886	0,5233				

KOJEISTOJEN KESTOISUUDET:

$I_{k(dyn)}=100 \text{ kA}$

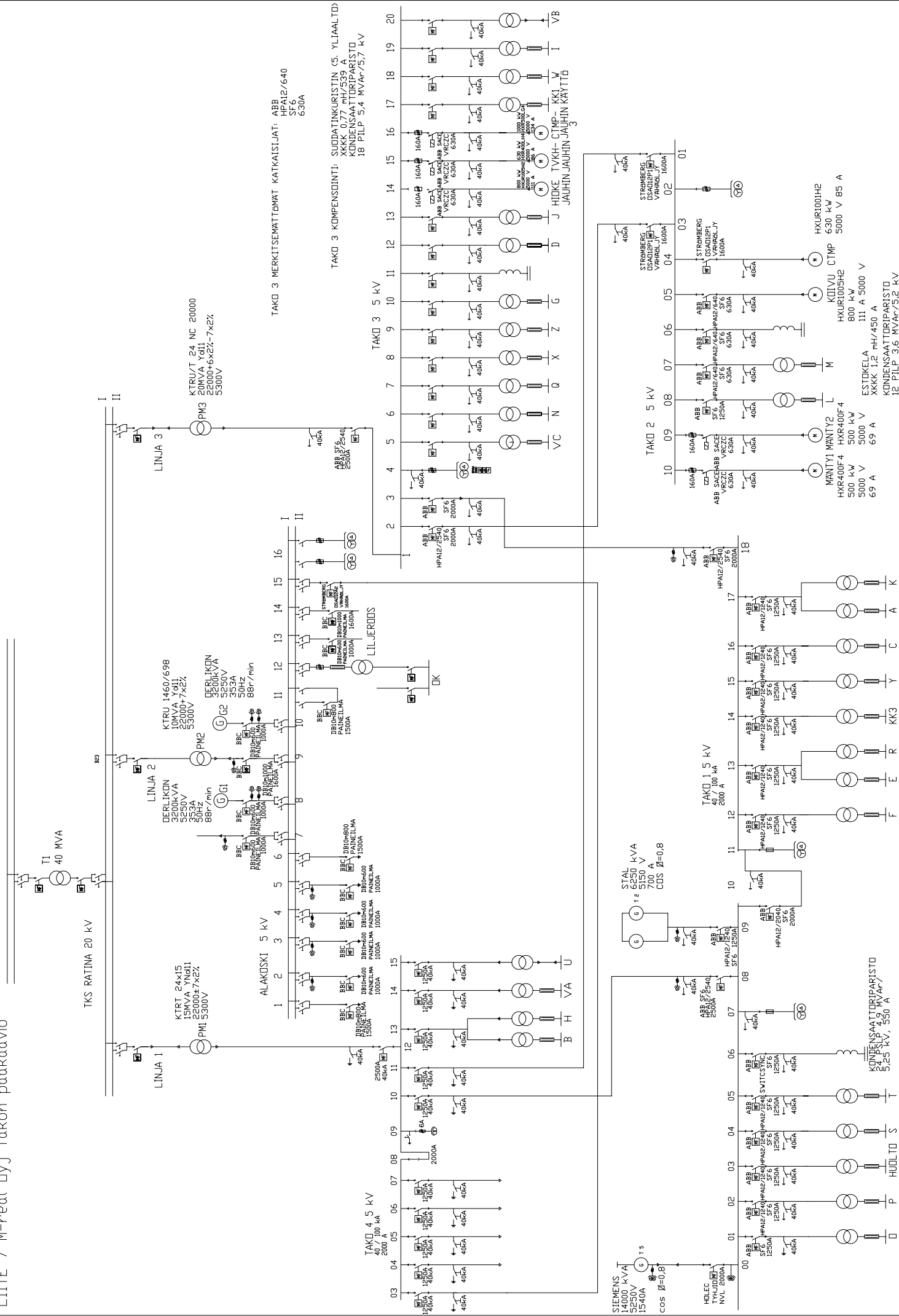
$I_{k(terminen)} = 40 \text{ kA}$

TKS RATINA 20 kV





## TKS RATINA 110 kV



Silmämääräisessä tarkastuksessa havaittiin seuraavat puutteet:

Kohde	Havaitut viat
PM1	Hieman vuotoa paisuntasäiliön alueella
PM2	Hieman pölyinen, vähäistä vuotoa
K-muuntaja	Kuivain huollettava
A-muuntaja	Hieman öljyvuotoa, likainen
C-muuntaja	Pientä öljyvuotoa
U-muuntaja	Hieman linnun ulostetta muuntajatilassa
T-muuntaja	Hieman vuotoa
S-muuntaja	Hieman vuotoa
O-muuntaja	Alaosassa hieman vuotoa
VB-muuntaja	Kuivain hieman huono, ovi ei aukea
VA-muuntaja	Vuotoja, likainen
D-muuntaja	Kuivaimen öljy likaista, pölyinen
B-muuntaja	Pölyinen
H-muuntaja	Pölyinen, vähäistä vuotoa
G-muuntaja	Huomattavasti linnun ulostetta
F-muuntaja	linnun ulostetta, vähäistä vuotoa
J ja KK1	Muuntajatilassa kuuma

Muuntajien öljyvuodot aiheutuvat pääosin tyhjennysproppujen vuotamisesta. G- ja F-muuntajien yläpuolisessa lintuverkossa on suurella todennäköisyydellä reikä. VA- ja VB- muuntajien muuntajatilán toinen ovi ei aukea lainkaan.